

POUR LA

Édition française de Scientific American

SCIENCE

BIOLOGIE MARINE
**DU PLANKTON
MI-ANIMAL
MI-VÉGÉTAL**

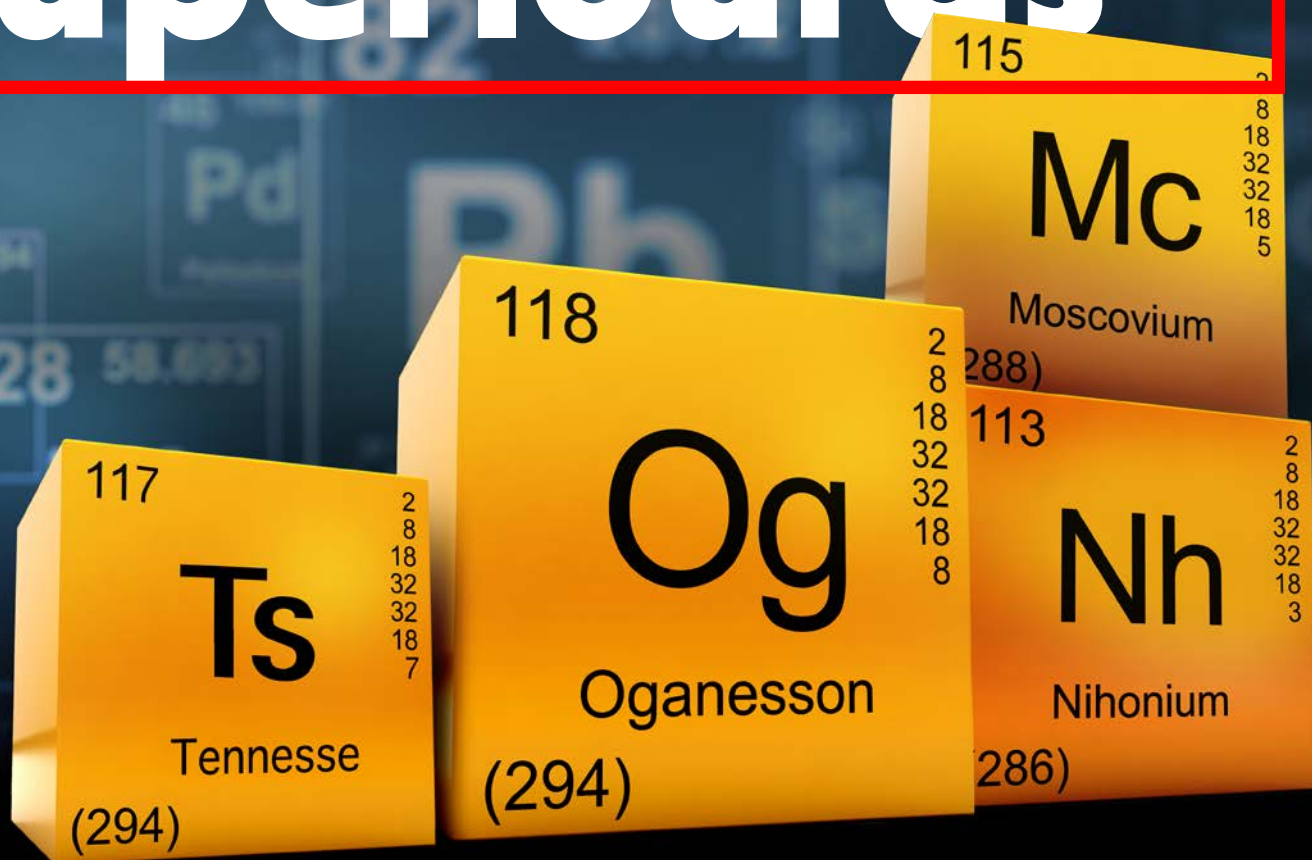
ASTROPHYSIQUE
**PLEINS FEUX SUR
LES PREMIÈRES
GALAXIES**

PREHISTOIRE
**LE RÉCHAUFFEMENT
QUI ACHEVA
LE MAGDALÉNIEN**

FEBVRIER 2019
N° 496

TABLEAU PÉRIODIQUE

La course aux éléments superlourds



ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

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



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

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



www.pourlascience.fr

70 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnie

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Community manager: Aëla Kervhuel

HORS-SERIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Patrick Cœur

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Laurent Bruxelles, Philippe Clergeau, Thomas Deffieux,

Chantal Ducoux, Rémi Franco, Michele Fumagalli, Hélène

Gélot, Claire Heitz, Jean-Luc Imler, Mathilde Jauzac, Elias

Khan, Sophie Lem, Marius Millot, Xavier Müller, Christine

Oberlin, Sandrine Péron, Christophe Pichon, William

Rowe-Pirra, Mickael Tanter

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements –

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou

francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus

dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans

les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à

« Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

« Pour la Science S.A.R.L. » Tous droits de reproduction, de traduction,

d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque

et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. »

en application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire

intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de

l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue

des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Papiers de fibres recyclés: 30 %

Eutrophisation ou « Impact

sur l'eau »: P. 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

EN QUÊTE DE GLOIRE ET DE STABILITÉ

Il y a un peu plus d'un an, l'assemblée générale des Nations unies a proclamé 2019 « année internationale du tableau périodique des éléments ». Bien que ce ne soit pas le seul thème choisi par cette instance pour 2019 – il y a aussi les « langues autochtones » et la « modération » –, cette initiative a le mérite de mettre sous les feux des projecteurs l'une des grandes icônes de la science moderne. Rappelons que ce tableau, qui organise les éléments chimiques de telle façon que chaque colonne du tableau regroupe des éléments aux propriétés chimiques similaires.

Sous sa forme actuelle, le tableau périodique des éléments résume une bonne partie du savoir sur la structure atomique de la matière et ses propriétés chimiques. Notamment, le « numéro atomique » de chaque élément dans le tableau correspond au nombre de protons que contient le noyau de l'atome de cette espèce. Ce numéro n'est pas illimité: plus le nombre de protons est élevé, plus leur répulsion mutuelle déstabilise le noyau. De fait, on n'a observé à ce jour que des éléments allant jusqu'au numéro atomique 118. De plus, près d'une vingtaine, très instables et donc de très courte durée de vie, n'ont été créés qu'artificiellement, par des réactions nucléaires.

Depuis des décennies, plusieurs équipes dans le monde sont ainsi en compétition pour prolonger le tableau de Mendeleïev. Le dernier épisode marquant de cette quête a eu lieu en 2015, avec l'annonce officielle de la synthèse des éléments 113, 115, 117 et 118 (voir pages 28 à 36). La course aux éléments nouveaux promettant la gloire aux gagnants, des frictions et controverses ont presque inévitablement surgi avec l'annonce de 2015 (voir pages 38 à 41). Mais il n'est pas uniquement question de gloire. La synthèse d'éléments nouveaux fait progresser la compréhension de la matière nucléaire et des atomes superlourds. Et, prédisent les théoriciens, certains noyaux superlourds non encore produits devraient être relativement stables. Leur synthèse est un graal: elle ouvrirait surtout de nouveaux horizons. ■

S

SOMMAIRE

N° 496 /
Février 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

Des outils vieux
de 2,4 millions d'années
en Afrique du Nord
Maladies de la rétine:
un rôle clé du fer
De la supraconductivité à
température quasi ambiante
Une carte mondiale
des émissions d'ammoniac
Du carbone 14 bien calibré
Comment les veines
et les artères s'organisent
Un duo staphylocoque-firus
qui passe inaperçu
Un invertébré à l'immunité
presque humaine
Éliminer les réservoirs du
VIH: la piste du métabolisme

P. 20

NATURES DU MOI

P. 22

AGENCE

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATICUS

«It from bit»,
la matière repensée
Gilles Dowek

P. 26

QUESTIONS DE CONFIANCE

Le jour sans fin des OGM
Virginie Tournay

LA SCIENCE

La course
aux éléments
superlourds

En couverture:

© ConceptW; Jason Winter/
iutterstock.com

Les portraits des contributeurs
ont été de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart
des éditions HumenSciences
sur une sélection d'abonnés France
Métropolitaine

GRANDS FORMATS



P. 42

ARCHÉOLOGIE

ET LE RÉCHAUFFEMENT ACHEVA LE MAGDALÉNIEN

Sonia Grimm et Daniela Hols

Lorsqu'en Europe des forêts
ont remplacé la toundra
parcourue d'immenses
troupeaux de rennes,
de chevaux ou de bisons,
les chasseurs-cueilleurs se
sont adaptés. Leurs réactions
ont suivi l'évolution
du climat, mais avec retard.



P. 50

ÉCOLOGIE MARINE

LE PLANCTON ANIMAL QUI VOULAIT DEVENIR VÉGÉTAL

Aditee Mitra

Certains microorganismes
du plancton marin font
de la photosynthèse, comme
les plantes, et mangent
d'autres organismes, comme
les animaux. Les biologistes
ont découvert que ces
minuscules végétaux
prédateurs jouent dans
les océans un rôle bien
plus important qu'on
ne le pensait.



P. 60

ASTRONOMIE

PLEINS FEUX SUR LES PREMIÈRES GALAXIES

Dan Coe

Les astronomes commencent
à observer les galaxies les
plus anciennes de l'Univers.
Ce qui ouvre une fenêtre sur
une période quasi inconnue
de l'histoire cosmique.



P. 70

ÉVOLUTION

PISSENLIT DES VILLES, PISSENLIT DES CHAMPS

Menno Schilthuis

Bonne nouvelle: certaines
espèces d'animaux
et de plantes s'adaptent
à l'environnement urbain,
souvent avec une étonnante
rapidité. Mauvaise nouvelle:
l'urbanisation galopante
risque aussi de conduire
à l'extinction un grand
nombre d'espèces.



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. 76

HISTOIRE DES SCIENCES

LE CHIEN QUI A FAIT PAVLOV

Daniela Ovadia

En découvrant le réflexe conditionné, le médecin et physiologiste russe a profondément influencé la psychologie moderne.

À LA UNE

P. 28

SCIENCE

LA COURSE AUX ÉLÉMENTS SUPERLOURDS

Christoph E. Düllmann et Michael Bloe

Plusieurs équipes de physiciens se livrent une course effrénée pour produire les noyaux atomiques les plus lourds qui puissent exister. Leur objectif : être les premiers à planter leur drapeau sur le fameux « îlot de stabilité », région du tableau périodique qui grouperait les éléments superlourds et cependant non éphémères.



P. 38

SCIENCE

DU RIFI SUR LE TABLEAU PÉRIODIQUE

Edwin Cartlidge

L'officialisation et l'annonce en fanfare, à la fin de 2015, de la synthèse des éléments superlourds ayant pour numéros atomiques 113, 115, 117 et 118 ont aussitôt déclenché une controverse : la proclamation de ces découvertes n'était-elle pas prématurée ?

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

MYSTÉRIEUX DIVISEURS

Jean-Paul Delahaye

La somme des diviseurs d'un nombre entier suscite une multitude d'interrogations. Depuis plus de deux millénaires, des passionnés tentent d'y répondre. Une tâche inachevée !

P. 86

ART & SCIENCE

La baleine bleue cherche encore de l'eau
Loïc Mangin



P. 88

DÉES DE PHYSIQUE

L'ascension de la chaîne fontaine
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Pourquoi les zèbres sont-ils zébrés ?
Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Extraire du vin des mauvais goûts
Hervé This

P. 98

APICORÉ

A

CTUALITÉS

2.6 Echos des labos
2.20 Livres du mois
2.22 Agenda
2.24 Homo sapiens informaticus
2.26 Questions de confiance

PALEOANTHROPOLOGIE

DES OUTILS VIEUX DE 2,4 MILLIONS D'ANNÉES EN AFRIQUE DU NORD



L'un des galets aménagés découverts à Aïn Boucherit et les environs du gisement

La découverte en Algérie d'un site oldowayen datant de 2,4 millions d'années suggère qu'après son émergence, l'humanité s'est très vite répandue dans toute l'Afrique.

L'histoire évolutive des hominés (les descendants du dernier ancêtre commun du chimpanzé et de l'homme) s'enrichit d'une donnée majeure. Autour de Mohamed Sahnouni, du Centre espagnol de

Burgos, et du Centre algérien de recherches préhistoriques, anthropologiques et historiques, à Alger, une équipe de chercheurs a découvert à Aïn Boucherit, dans la commune de Guelta Zerka (région de Sétif), deux strates archéologiques contenant des outils oldowayens.

L'Oldowayen est le nom donné à la plus ancienne culture matérielle traditionnellement associée au genre *Homo*. Ses plus anciennes manifestations archéologiques sont longtemps restées confinées à l'Afrique de l'Est, que l'on a considérée pour cette raison comme le berceau de l'humanité. C'est cela que la découverte algérienne vient relativiser : les deux strates archéologiques découvertes par l'équipe de Mohamed Sahnouni se trouvent au sein d'une pente stratifiée constituant le flanc d'un profond ravin. Elles contiennent des galets aménagés et des éclats accompagnés de nombreux

ossements fossiles d'animaux typiques de la savane, dont des équidés, des bovidés et des suidés (cochons), des mastodontes et autres éléphants, des rhinocéros, des hyènes, des crocodiles, etc. Les Oldowayens ont manifestement exploité ces animaux, puisque de nombreux os portent des traces de découpe ou de percussion. Afin de façonner leurs outils de boucherie, ils se sont simplement procuré du calcaire ou du silex dans les lits des ruisseaux environnants, ce qui montre leur opportunisme.

Afin de dater leur site, les chercheurs ont d'abord procédé à l'étude magnétostratigraphique des sédiments. Cette technique consiste à identifier dans les dépôts sédimentaires une succession d'inversions de la polarité du champ magnétique terrestre, puis à essayer de

Maladies de la rétine : un rôle clé du fer

Le décollement de rétine touche 10 à 55 individus pour 100 000 par an et s'accompagne souvent d'une perte de vision. Une équipe dirigée par Émilie Picard et Francine Behar-Cohen, du centre de recherche des Cordeliers, suggère que diminuer la quantité de fer libre dans l'œil limiterait les dégâts. Le point avec Émilie Picard.



Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

ÉMILIE PICARD
Chercheuse à l'Inserm
au sein de l'UMRS1138,
au centre de recherche
des Cordeliers, à Paris

Le traitement actuel consiste à recoller la rétine. Quelles sont ses limites ?

D'une part, plus le délai est long entre le moment où la rétine s'est décollée et l'opération, moins la rétine est préservée. En effet, dès qu'elle se décolle, des cellules de la rétine (photorécepteurs et autres neurones) commencent à mourir et ne sont pas remplacées. D'autre part, si la zone centrale ou macula est touchée, les chances de récupérer la vision sont moindres. Enfin, l'âge de la personne est important.

Pourquoi s'intéresser au fer ?

Le fer est indispensable au fonctionnement de toutes les cellules de l'organisme. Mais quand il est trop abondant, les protéines qui habituellement se lient à lui ne sont plus assez nombreuses pour le piéger. Or sous sa forme libre, il est toxique pour les cellules : il favorise l'apparition d'un stress oxydant qui entraîne leur mort. Par ailleurs, on savait depuis longtemps que du fer s'accumule dans des modèles de dégénérescence rétinienne. Nous avons depuis montré que c'est le cas dans la dégénérescence maculaire liée à l'âge et dans la rétinopathie diabétique, et à présent dans le décollement rétinien : chez des patients atteints, la perte de fonction visuelle après opération est corrélée à la quantité de fer dans les fluides oculaires.

Comment prévenir cette accumulation ?

Des molécules capables de sequestrer le fer sont déjà utilisées dans certaines pathologies. Toutefois, elles sont toxiques pour l'œil et difficiles à administrer. Nous nous sommes donc intéressés à la transferrine, une protéine que toutes les cellules de l'organisme synthétisent et qui est présente dans les liquides intraoculaires. La transferrine se lie au fer et le transporte de cellule en

cellule. Précédemment, j'avais montré, dans différents modèles animaux, qu'elle protégeait la rétine face à différents stress. Nous avons donc voulu examiner son utilité dans le décollement de rétine.

Comment avez-vous procédé ?

D'abord, nous avons étudié son effet sur des rétines de rat mises en culture. Elles imitent bien le décollement de rétine et permettent de contrôler le stress appliqué. Nous avons ainsi observé qu'ajouter de la transferrine protégeait les photorécepteurs et évitait tous les phénomènes pathologiques associés au décollement de la rétine (inflammation, œdèmes, mort cellulaire...). Puis nous avons injecté de la transferrine humaine dans le vitré de l'œil (le gel qui le remplit) de souris et de rats dont on avait décollé la rétine (en injectant au même moment un produit sous celle-ci). Là encore, l'addition de transferrine a préservé la rétine des effets délétères.

Comment la transferrine agit-elle ?

La séquestration du fer est certainement l'un de ses premiers effets, mais notre étude suggère qu'il y en a d'autres. En comparant le transcriptome l'ensemble des ARN messagers, les intermédiaires de fabrication des protéines) de la rétine d'animaux traités et non traités à la transferrine, nous avons découvert que la transferrine module d'autres voies comme l'inflammation ou la mort cellulaire. Nous étudions à présent ces mécanismes.

Envisagez-vous des essais cliniques ?

Nous travaillons avec une start-up lyonnaise, sur un traitement d'appoint à la chirurgie. L'objectif est d'introduire dans les cellules de l'œil une petite molécule d'ADN circulaire contenant le gène de la transferrine humaine. La méthode serait réversible, car cette molécule ne s'insère pas dans le génome, et les cellules devraient produire cette transferrine pendant plusieurs mois. Nous espérons lancer un essai clinique d'ici à cinq ans. ■

A. Daruich *et al.*, *Science Advances*, vol. 5, article eaau9940, 2019

es rattacher à des inversions magnétiques connues et bien datées. Pour ce faire, Mathieu Duval, du Centre australien de recherche sur l'évolution humaine de l'université de Griffith, a utilisé une technique de datation permettant d'estimer le temps passé par un grain de quartz sous terre: la résonance paramagnétique électronique. Il a prélevé un échantillon de sédiment enfoui à environ un mètre sous le niveau archéologique le plus profond et en a extrait les grains de quartz pour en obtenir une estimation du temps passé sous terre.

Le résultat obtenu a permis de déduire que le niveau archéologique profond d'Aïn Boucherit se situe au début de la période géomagnétique de Matuyama, qui commence à 2,58 millions d'années et se termine il y a 1,94 million d'années. Il restait donc à dater plus précisément les deux strates. Les chercheurs l'ont fait en modélisant la sédimentation à l'origine de la pile sédimentaire d'Aïn Boucherit. Ils ont supposé que les sédiments s'y sont accumulés régulièrement et ont négligé l'occurrence de possibles événements de compactage. Ils parviennent ainsi à situer les deux strates archéologiques à $2,44 \pm 0,14$ millions d'années pour la plus profonde et à $1,92 \pm 0,05$ million d'années pour l'autre.

Selon les chercheurs, les caractéristiques fines des outils d'Aïn Boucherit poussent à les rapprocher de ceux de Gona en Éthiopie, âgés de 2,6 millions d'années. Par ailleurs, depuis les années 2000, on connaît aussi des sites oldowayens en Afrique du Sud datés de 2,19 millions d'années. L'Oldowayen est-il apparu simultanément dans plusieurs régions d'Afrique? Peut-être, mais les chercheurs envisagent une autre possibilité, sans doute plus vraisemblable: le déplacement des porteurs de cette culture matérielle sur de grandes distances à l'intérieur de l'Afrique dès les débuts de l'Oldowayen, donc entre 2,6 millions d'années (Gona) et 2,4 millions d'années (âge d'Aïn Boucherit).

Cette explication pousse à faire des porteurs du premier Oldowayen des humains plutôt que des préhumains, puisque la mobilité sur de grandes distances est l'une des caractéristiques jamais démenties de l'humanité. Si cette logique est la bonne, alors le berceau de l'humanité est l'Afrique entière. ■

FRANÇOIS SAVATIER

M. Sahnouni *et al.*, *Science*, vol. 362, pp. 1297-1301, 2018

PHYSIQUE

DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ À TEMPÉRATURE QUASI AMBIANTE

Un composé de lanthane et d'hydrogène serait supraconducteur à une température proche de 0 °C, mais sous une pression énorme de 2 millions d'atmosphères.

A très basse température, certains matériaux deviennent supraconducteurs : leur résistance électrique s'annule. Les applications sont nombreuses mais impliquent de refroidir ces matériaux à une température proche du zéro absolu (−273 °C), ce qui est coûteux et difficile à manipuler. Aussi, l'un des défis est-il d'obtenir des supraconducteurs à température ambiante. Or l'équipe de Maddury Somayazulu et Russell Hemley, de l'université George-Washington, à Washington, a observé des signes de supraconductivité jusqu'à 260 kelvins (−13,5 °C) avec le superhydru- de lanthane LaH.

Ce résultat est une étape cruciale dans la quête quasi centenaire d'une supraconduction à température ambiante. Les premiers supraconducteurs connus et la théorie BCS, développée en 1957 pour expliquer le phénomène, laissaient peu d'espoir d'observer cet effet à plus de quelques kelvins. Or en 1986, Karl Müller et Johannes Bednorz, chercheurs chez IBM, ont mis en évidence la supraconductivité dans des matériaux céramiques à 35 kelvins (−238 °C). Les progrès dans ce domaine des supraconducteurs, dits non conventionnels car ils ne sont pas expliqués par la théorie BCS, ont permis d'établir un record à 112 kelvins (−140 °C).

Une autre piste pour gagner en température consiste à soumettre le matériau à une forte pression, de l'ordre de la centaine de gigapascals (1 million d'atmosphères). En 2015, l'équipe de Mikhail Eremets, de l'institut Max-Planck de chimie, à Mayence, a montré que le sulfure d'hydrogène (H₂S), soumis à une pression de 50 gigapascals dans une cellule à enclumes de diamant, forme un supraconducteur de type conventionnel jusqu'à −70 °C.

Des modèles montrent en effet que les composés riches en hydrogène, soumis à de fortes pressions, sont susceptibles d'être supraconducteurs, et peut-être jusqu'à des températures proches de l'ambiante. Ces matériaux présentent notamment des fréquences de vibration très élevées qui, selon la théorie BCS, favorisent la supraconductivité.

Lors de précédents travaux, Russell Hemley et ses collègues avaient étudié des composés de



Une cellule à enclumes de diamant est capable d'exercer des pressions de plusieurs centaines de gigapascals (des millions de fois la pression atmosphérique).

1,9 K

PLUS GRAND
ACCÉLÉRATEUR
DE PARTICULES
DU CERN,
EST LE PLUS GRAND
SYSTÈME
CRYOGÉNIQUE
DU MONDE.
IL COMPREND
PLUS D'UN MILLIER
DE GRANDS AIMANTS
SUPRACONDUCTEURS
REFROIDIS
À 1,9 KELVIN GRÂCE
À 120 TONNES
D'HÉLIUM LIQUIDE.

lanthane et d'hydrogène à 200 gigapascals et ont notamment formé du superhydru- de lanthane LaH₁₀. Dans leur nouvelle expérience, les chercheurs ont utilisé une autre voie de synthèse, en partant de borazane (BH₃NH₃) comme source d'hydrogène. Le mélange de lanthane et de borazane est d'abord chauffé par un laser pour la synthèse du LaH₁₀. Les chercheurs ont ensuite suivi le refroidissement du composé tout en mesurant sa résistance électrique. Celle-ci chute à partir de 260 kelvins (−13,5 °C, pour une pression de 188 gigapascals), signe de la supraconductivité. Cette température pulvérise le précédent record. L'équipe de Mikhail Eremets a reproduit l'expérience et confirme le comportement exceptionnel du LaH.

En quelques décennies, la température record des supraconducteurs n'a cessé de grimper. « Notre résultat constitue l'une des nombreuses étapes dans la recherche de la supraconductivité à température ambiante avec des superhydru- et avec d'autres matériaux », commente Russell Hemley, « et nous espérons, à terme, développer des matériaux exhibant cette propriété à pression plus basse, en vue d'applications pratiques. » ■

JEAN BAILLY

M. Somayazulu et al., *Physical Review Letters*, paraître 2019

METHANE
NIRS AGIAIR

Le méthane (CH₄) réchauffe l'atmosphère 25 à 30 fois plus que le CO₂. Autour de Guillaume Lamarche-Gagnon, de l'université libre de Bruxelles, une équipe vient de montrer, à l'aide de nouveaux capteurs placés dans les eaux de fonte, que les calottes glaciaires du Groenland en émettent beaucoup. Comme partout ailleurs, le méthane groenlandais est produit par des microorganismes anaérobies. Le rôle des organismes vivant sous la glace serait donc sous-estimé dans l'étude du réchauffement climatique en cours.

BALEINE MANGE
BALEINEAU

L'équipe de Maria Voss, paléontologue au Muséum d'histoire naturelle de Berlin, vient de montrer qu'il y a quelque 35 millions d'années, *Basilosaurus isis*, une baleine fossile découverte dans le Wadi Al-Hitan (l'« oued des baleines »), en Égypte, était un superprédateur. L'étude du contenu stomacal fossilisé de *B. isis* révèle en effet que ce cétacé se nourrissait des baleineaux de *Dorudon atrox*, une autre espèce de baleine de son époque.

LES ELEPHANTS ONT
UN BOIS CYCLOPÉ

Le bois des éléphants, au moins ceux qui vivent dans les bois, fluctue au cours de leur vie adulte selon un cycle d'une centaine de mois. C'est ce qu'ont découvert Marcus Klaus, de l'université de Zurich, et ses collègues. Cette fluctuation semble liée à la façon particulière dont ces grands masticateurs les végétaux renouvellent leurs dents. Selon le nombre de dents qu'ils ont en train de renouveler, ils disposent en effet de plus ou moins de surface de mastication. Ce qui a un impact sur la quantité de nourriture ingérée ou sur l'efficacité de la digestion.

ÉPOUILLER FAIT
DU BIEN À TOUS

Notre témoin d'une bonne action peut nous réjouir, tout comme un fou rire peut être communicatif... Ce phénomène

documenté chez l'humain. Mais qu'en est-il chez les autres animaux? Juliette Berthier et Stuart Semple, de l'université de Roehampton, à Londres, ont observé pendant plus de deux mois vingt macaques de Barbarie dans la réserve du domaine de Trentham, au Royaume-Uni. Ils se sont intéressés à une interaction sociale très répandue: l'épouillage.

Pour évaluer l'état émotionnel de ces macaques, les deux chercheurs ont mesuré la fréquence de comportements anxieux tels que le grattage, le bâillement et l'autoépouillage, dans deux situations différentes: lorsque l'animal observait deux congénères qui s'épouillaient et lorsqu'il ne voyait aucune interaction d'épouillage. En comparant ces deux mesures chez un même singe, Juliette Berthier et Stuart Semple ont montré qu'observer une séance d'épouillage réduisait significativement l'état d'anxiété du spectateur. Ainsi, les macaques de Barbarie sont sensibles à la contagion d'émotions positives, telle la relaxation.

Les deux biologistes ont aussi constaté qu'observer les séances de toilettage poussait



Séance d'épouillage chez des macaques de Barbarie (*Macaca sylvanus*).

les macaques à se comporter de façon plus amicale avec les autres membres du groupe. Par exemple, un tel singe est plus enclin et plus rapide à proposer à son tour un toilettage à l'un de ses congénères. De façon surprenante, l'étude montre toutefois que l'observation d'un toilettage ne diminue pas les comportements agressifs des spectateurs vis-à-vis des autres singes. «Les comportements amicaux et agressifs sont deux classes de comportements qui font probablement appel à des mécanismes cognitifs indépendants et ne sont pas forcément antagonistes», conclut Juliette Berthier. ■

CORALINE MADEC

J. M. Berthier et S. Semple, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 285, article 20181964, 2018.

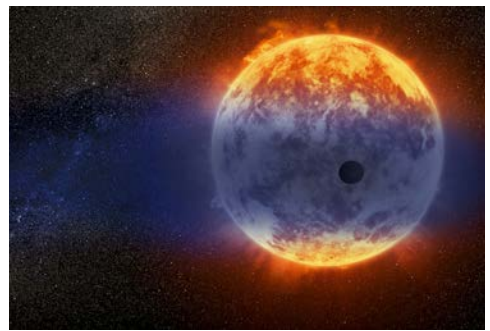
ASTROPHYSIQUE

DES NEPTUNES
QUI S'ÉVAPORENT

Parmi les exoplanètes connues qui évoluent très près de leur étoile, on trouve

des Jupiters chaudes, des super-Terres (un peu plus grosses que la Terre) et des Neptune de la taille de Neptune. On parle donc de désert des Neptunes chaudes. Une explication serait que leur atmosphère chaude et enflée perdrait très vite du gaz, au point de disparaître entièrement en ne laissant que le cœur rocheux de la planète, de la taille d'une super-Terre.

Vincent Bourrier, de l'université de Genève, et ses collègues ont étudié GJ 3470b, une exoplanète de la taille de Neptune mais dont la température modérée la place à la limite des Neptunes chaudes. Ils ont montré qu'elle perd tout de même 10⁴ à 10⁵ tonnes d'hydrogène par seconde. Près d'un tiers de la masse de la planète se serait ainsi évaporé depuis sa formation, il y a deux



Sur cette vue d'artiste, la planète, très proche de son étoile, perd du gaz sous la forme d'un nuage étendu (en bleu).

milliards d'années. Ainsi, il est fort probable que les Neptunes encore plus chaudes perdent très vite leur atmosphère. Il faudra cependant observer d'autres exoplanètes de cette catégorie pour confirmer ce scénario et ainsi expliquer le désert des Neptunes chaudes. ■

S.B.

V. Bourrier et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 620, article A147, 2018.

UNE CARTE MONDIALE DES ÉMISSIONS D'AMMONIAC

L'ammoniac (NH_3) est un polluant bien connu. Il a un impact sur l'environnement (pluies acides, eutrophisation) et sur la santé (c'est un précurseur de particules fines qui pénètrent profondément dans les poumons). Aussi est-il impératif de surveiller les émissions de ce gaz dans l'atmosphère. Or la production d'ammoniac est en grande partie liée à l'agriculture inten-

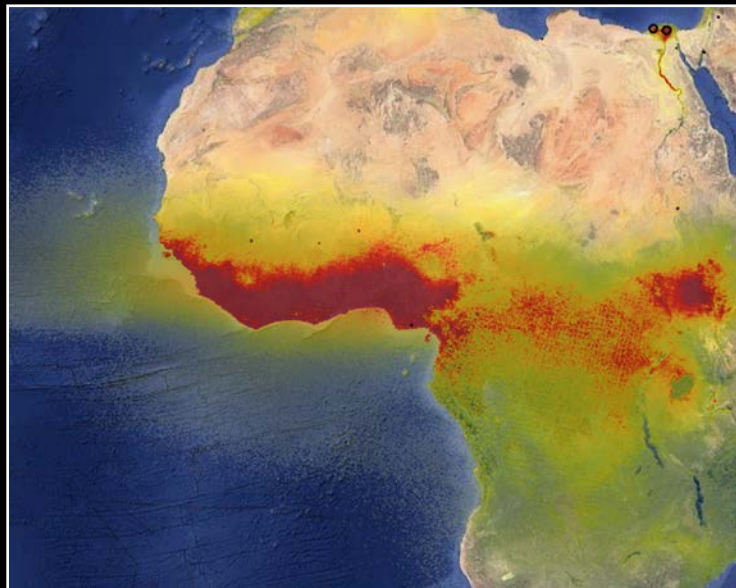
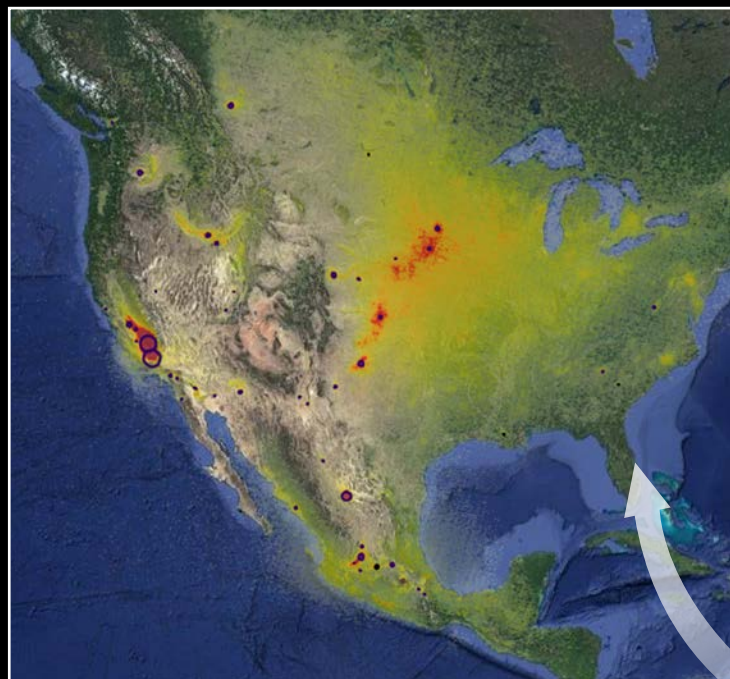
sive (« interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge »), développé par le Cnes et embarqué par des satellites *Metop*, a enregistré les flux quotidiens d'ammoniac entre 2008 et 2016 à l'échelle du globe. Un traitement des données amélioré a permis d'obtenir des cadastres d'émission avec une résolution de l'ordre du kilomètre carré.

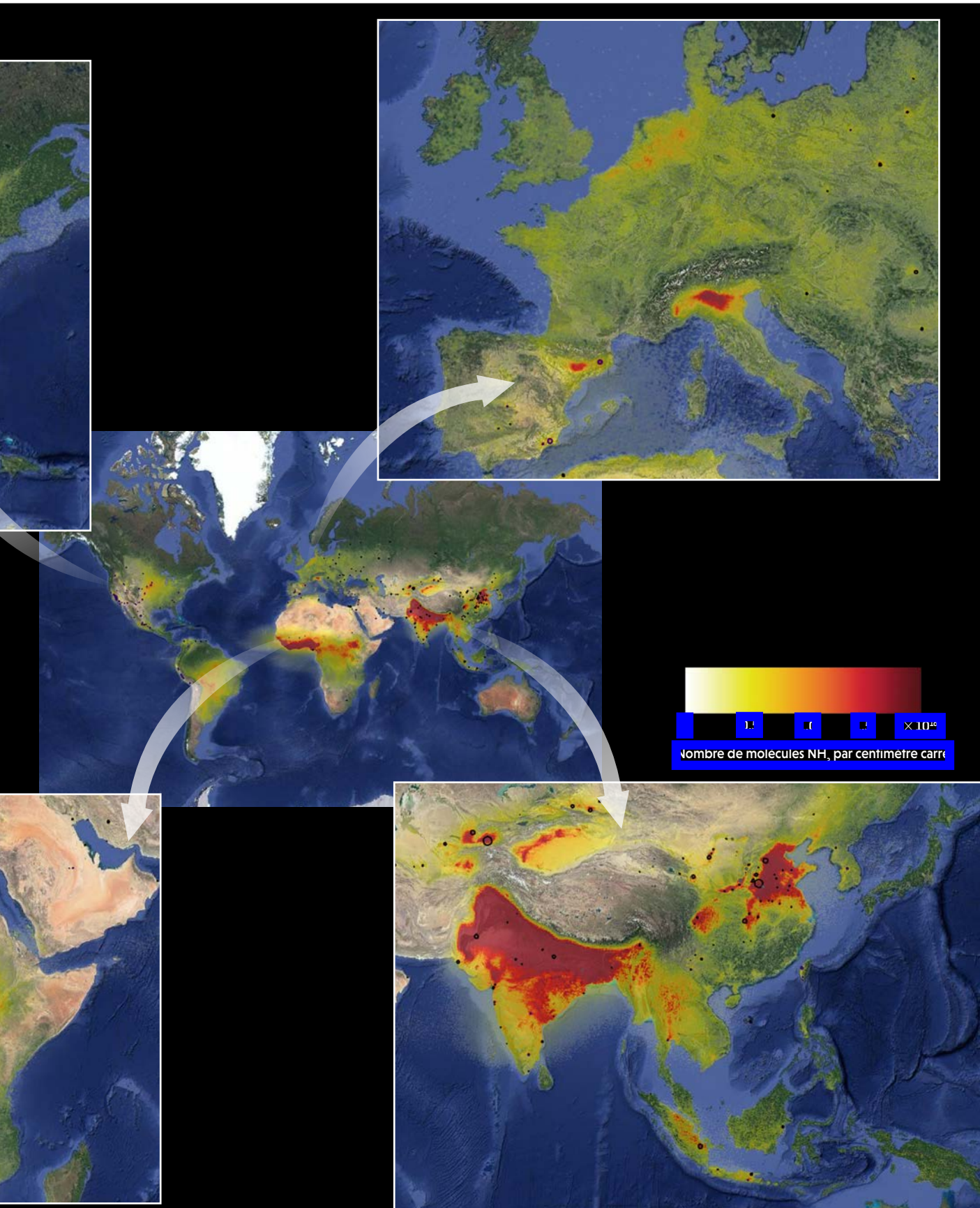
Cathy Clerbaux, directrice de recherche du CNRS au Latmos, à Paris, et ses collègues belges ont ainsi répertorié 241 « points chauds » : des sources d'ammoniac très localisées de moins de 50 kilomètres de diamètre. En comparant la position de chaque source à des images prises par satellite, les chercheurs ont montré qu'il s'agissait de 83 sites d'agriculture intensive (élevage de bovins, cochons ou volailles, voir le médaillon sur le continent nord-américain) et de 158 sites industriels (principalement des usines de production d'engrais). Ils ont aussi observé 178 zones d'émissions plus étendues, qui correspondent à des régions de culture céréalières (comme les plaines du Gange et de l'Indus, ou celle du nord de la Chine) et des régions où l'on brûle beaucoup de biomasse (l'Afrique de l'Ouest notamment).

Cette étude montre surtout que près de deux tiers des sources étaient inconnues et que les émissions des sources déjà connues étaient fortement sous-estimées. Dès lors, c'est l'ensemble des flux atmosphériques de l'ammoniac qui sont à réévaluer pour mieux déterminer leur impact sur l'environnement et la santé. Depuis 1999, 25 pays et l'Union européenne se sont engagés dans le protocole de Göteborg pour diminuer les émissions d'ammoniac et d'autres polluants. En France, un plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques est en cours de révision. L'objectif serait de réduire les émissions d'ammoniac de 3% d'ici à 2030, par rapport à 2005. ■

S.B.

M. Van Damme et al., *Nature*, vol. 564, pp. 99-103, 2018
Carte interactive : <http://www.uib.ac.be/crm/NH3-IASI.htm>





ARCHÉOLOGIE

DU CARBONE 14 BIEN CALIBRÉ

La datation par le carbone 14 progresse sans cesse grâce aux efforts de nombreuses équipes pour la calibrer période après période. Une équipe de la grotte de Hulu, en Chine, vient de calibrer précisément les dates données par le radiocarbone jusqu'à 54 000 ans BP (« avant le présent », c'est-à-dire avant 1950). Comment ? À partir de stalagmites.

La datation par le carbone 14 ne livre des dates coïncidant avec celles du calendrier que sur deux mille ans environ. Au-delà, il faut la réétalonner siècle par siècle, car la production du carbone 14 atmosphérique par le rayonnement cosmique a varié dans le temps. Pour ce faire, on doit disposer de matériaux simultanément datables par le radiocarbone et par une autre méthode. L'étude des cernes de croissance des arbres a ainsi permis d'étalonner les dates du radiocarbone sur les derniers 10 000 ans. Parce qu'elle peut être datée à la fois par le radiocarbone et par l'uranium-thorium, une stalagmite constitue un autre matériau doublement datable. Toutefois, comme le carbone qu'elle contient provient à la fois de l'atmosphère (ruissellement) et des formations calcaires (carbonate de calcium), une correction doit être appliquée à leur âge radiocarbone, laquelle varie de grotte en grotte. C'est sur ce



Les stalagmites anciennes MSD et MSL de la grotte de Hulu, en Chine, ont été datées strate par strate.

point que les stalagmites de la grotte de Hulu, en Chine, se sont révélées intéressantes.

En 2012, après avoir montré que la correction attachée à la stalagmite H82 n'est que de 450 ans, les chercheurs ont étalonné les dates radiocarbone jusqu'à 26 800 ans BP. L'équipe de Hai Cheng vient de montrer que les stalagmites plus anciennes MSD et MSL ont la même correction que H82. Ils sont ainsi parvenus à calibrer les dates radiocarbone avec une incertitude inférieure à 100 ans jusqu'à 40 000 ans BP, puis inférieure à 300 ans jusqu'à 54 000 ans BP. ■

P.S.

Hai Cheng et al., *Science*, en ligne le 14 décembre 2011.

CHIMIE

RECYCLER L'OR DE L'ÉLECTRONIQUE

À un prix actuel de l'or (36 000 euros le kilogramme), il est très intéressant de le recycler, notamment dans l'élec-

trique. Les chercheurs ont développé une méthode qui leur sont un atout. Il existe déjà une méthode de recyclage par solubilisation sélective, mais cette technique utilise des acides très toxiques.

Minna Räisänen, de l'université de Helsinki, et son équipe ont amélioré cette méthode en remplaçant les composés toxiques par un mélange d'eau oxygénée et de pyridinethiol, un composé organique soufré peu toxique. D'après leurs essais, quelques minutes suffisent pour qu'un échantillon d'or se dissolve complètement dans le mélange.

Les chercheurs ont établi le mécanisme de cette dissolution : en premier lieu, deux molécules de pyridinethiol se lient à chacun des



L'industrie de l'électronique représente près de 10 % de la consommation annuelle d'or dans le monde.

atomes d'or et les arrachent au reste du métal. Les atomes d'or sont ensuite oxydés, c'est-à-dire privés d'un de leurs électrons par l'eau oxygénée. Le complexe organométallique ainsi créé est stable et soluble dans le solvant organique. En outre, la réaction ne solubilise ni le platine ni le palladium, deux autres métaux très utilisés. ■

MARTIN TIANO

M. Räisänen et al., *Angewandte Chemie Int. Ed.*, vol. 51(52), pp. 17104-17109, 2012.

EN BREVE

STRESS DE GROSSESSE ET OBÉSITÉ INFANTILE

En Allemagne, un enfant sur dix est en surpoids.

Environ vingt est obèse. Beate Lepert et ses collègues, à Berlin et à Leipzig, viennent de mettre en évidence l'un des cofacteurs de cette épidémie. Dans le cadre de l'étude mère-enfant LINA que ces chercheurs ont coordonnée, ils ont mis en évidence une corrélation statistique entre le stress ressenti par la mère lors de la grossesse et le surpoids futur du jeune enfant.

SURDOMINANCE CHEZ LES ORCHIDÉES

La surdominance, c'est-à-dire l'avantage

des hybrides, est l'une des hypothèses fondamentales de la théorie synthétique de l'évolution. Roman Kellenberger et ses collègues, des universités de Zurich et de Vienne, pensent l'avoir vérifiée dans le cas d'une orchidée des Alpes : la nigrételle noire (*Gymnadenia conopsea*). Dans une partie des Alpes, 38 % de ces fleurs sont rouges ou blanches, alors qu'elles sont normalement noires. Cette situation pourrait s'expliquer par des mutations de la plante, mais les chercheurs ont montré par la génétique qu'elle résulte plutôt de pollinisation, donc de la multiplication d'hybrides plus aptes à se reproduire.

UN POLE MAGNETIQUE MIGRE VERS LA RUSSIE

Une chose de bizarre se passe

en Russie. Le pôle magnétique Nord, qui se trouvait au nord du Canada depuis le XVII^e siècle au moins, se déplace vers le nord de la Sibérie. Et il bouge si vite que cela a forcé les experts en géomagnétisme du monde entier à prendre une mesure rare : le 15 janvier 2019, ils ont mis à jour le *World Magnetic Model*, le modèle décrivant le champ magnétique de la planète, qui sous-tend toute la navigation moderne.

TECHNOLOGIE

HAMR-E, UN ROBOT ARAIGNÉE

Sébastien de Rivaz et ses collègues, à l'université Harvard, ont construit un petit robot capable de marcher sur des sur-

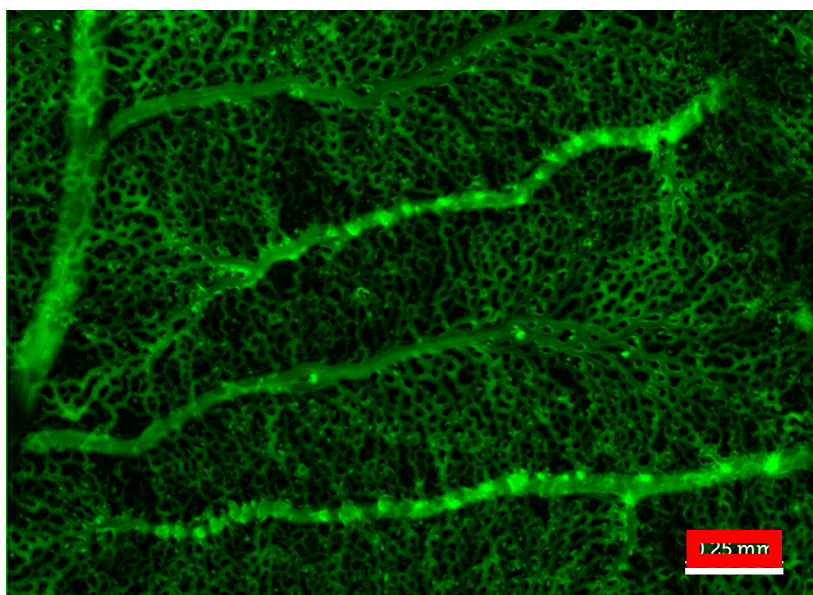
faces dans n'importe quel sens. Ne pesant que 48 grammes, ce petit engin, nommé HAMR-E et alimenté par un fil, est capable d'avancer à une vitesse de pointe de 4,6 millimètres par seconde au plafond, tout en portant une charge utile allant jusqu'à 4,72 grammes. Les chercheurs l'ont doté de patins adhésifs: des coussinets en cuivre couverts d'une couche isolante qui crée un champ électrostatique entre la patte du robot et la surface conductrice sous-jacente. Cette technique, l'électroadhésion, permet de coller deux surfaces de façon transitoire et pour très peu d'énergie. HAMR-E pourrait par exemple servir à explorer les moteurs d'avion en panne avant de les démonter. ■

FÉLIX PRÉVOST

S. de Rivaz et al., *Science Robotics*, vol. 3, eaaui3038, 2018

BIOLOGIE

COMMENT LES VEINES ET LES ARTÈRES S'ORGANISENT



Les artères (ici horizontales, en vert clair) et les veines (horizontales, en vert foncé) s'intercalent.

Le réseau des vaisseaux sanguins est remarquable par sa complexité et son organisation: les artères transportent le sang oxygéné et les nutriments vers les organes, le sang passe ensuite dans des capillaires avant d'être évacué par les veines. Ce réseau se constitue durant l'embryogenèse, mais de nombreux aspects de sa formation restent inconnus. Notamment, on remarque que les artères et les veines s'intercalent, reliées par les capillaires. Comment une telle organisation se met-elle en place? Les chercheurs ont développé une nouvelle technique d'imagerie pour suivre le développement des vaisseaux sanguins chez l'embryon de poulet.

Le réseau des vaisseaux sanguins est remarquable par sa complexité et son organisation: les artères transportent le sang oxygéné et les nutriments vers les organes, le sang passe ensuite dans des capillaires avant d'être évacué par les veines. Ce réseau se constitue durant l'embryogenèse, mais de nombreux aspects de sa formation restent inconnus. Notamment, on remarque que les artères et les veines s'intercalent, reliées par les capillaires. Comment une telle organisation se met-elle en place?

Les chercheurs ont développé une nouvelle technique d'imagerie pour suivre le développement des vaisseaux sanguins chez l'embryon de poulet.

Les chercheurs ont d'abord constaté que l'extrémité des artérioles (la partie la plus rétrécie des artères) est aplatie, comme sur un tuyau écrasé, quand le reste de ces vaisseaux est parfaitement cylindrique. Cette forme empêche le sang de s'évacuer par l'extrémité du vaisseau, contrairement à ce que l'on pensait. Le sang s'écoule donc dans les capillaires en amont de l'extrémité dans des directions perpendiculaires à l'artériole. En outre, la zone aplatie s'accompagne d'une inflammation et d'une rigidification des tissus. Celles-ci ont un effet de répulsion local sur les veines, qui sont repoussées au-delà de cette zone. Par ailleurs, les veines sont attirées par une force de cisaillement là où le sang s'écoule le plus, en amont de l'extrémité de l'artère. La conjonction de ces deux phénomènes, attractif et répulsif, conduit à la structure intercalée des artères et des veines.

Les chercheurs espèrent que la compréhension des mécanismes de vascularisation servira de point de départ pour étudier les organisations vasculaires dysfonctionnelles, comme la néoangiogenèse, le processus de formation de nouveaux vaisseaux sanguins qui irriguent les tumeurs de certains cancers. ■

LOU WAHNICH

J. Richard et al., *Communications Biology*, vol. 1, article 235, 2018

ASTROPHYSIQUE

UN NUAGE DE GAZ PRIMORDIAL

L'hydrogène, l'hélium et le lithium se sont formés quelques minutes après la naissance de l'Univers. Les éléments plus

«métaux» se sont constitués au sein des premières étoiles et dans les supernovæ. Or, presque tous les objets que l'on observe dans l'Univers, même dans les temps les plus reculés, contiennent une part d'éléments lourds. Seuls deux nuages de gaz ne contenant pas de traces de métaux ont été découverts, par hasard.

Frédéric Robert, de l'université de technologie Swinburne, en Australie, et ses collègues ont mis au point une stratégie pour chercher de tels nuages en utilisant la lumière de quasars lointains (galaxies dont le trou noir supermassif central émet beaucoup de rayonnement). En traversant un nuage, la lumière du quasar est altérée. En analysant un tel rayonnement, les chercheurs ont découvert un nuage exempt de toute contamination datant de 1,4 milliard d'années après le Big Bang. ■

ALEXANDRE ARAN

F. Robert et al., *MNRAS*, vol. 483(2), pp. 2736-2747, 2019

MICROBIOLOGIE

UN DUO STAPHYLOCOQUE-VIRUS QUI PASSE INAPERÇU

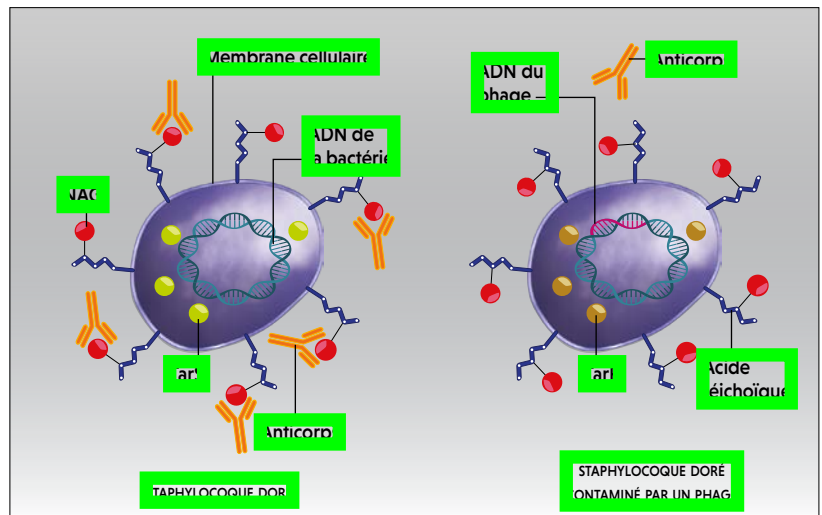
A cause d'une enzyme produite par un virus qui s'attaque au staphylocoque doré, cette dangereuse bactérie devient moins visible pour le système immunitaire humain

Le redouté staphylocoque doré, ou *Staphylococcus aureus*, est une bactérie pathogène pour l'homme, à l'origine de plusieurs types d'infections potentiellement mortelles, car il est résistant à de nombreux antibiotiques. On estime pourtant que 30

ne développe aucun symptôme. En fait, de nombreux facteurs modulent les interactions hôte-microbe, comme la présence ou l'absence d'autres bactéries. David Gerlach, de l'université de Tübingen, en Allemagne, et ses collègues viennent de montrer que des virus entrent aussi dans l'équation. Et que grâce à eux, les staphylocoques passent davantage sous le radar du système immunitaire de l'hôte.

Pour comprendre comment, il faut s'intéresser à la paroi cellulaire des staphylocoques dorés. Celle-ci est surtout constituée de peptidoglycanes et d'acides téichoïques. De nombreux anticorps humains efficaces contre *S. aureus* reconnaissent et se lient aux acides téichoïques. Mais ils ne sont pas les seuls. « Les acides téichoïques sont essentiels aux virus qui attaquent aux bactéries, les bactériophages, ou phages, pour s'attacher à elles et les infecter », explique Ivo Gomperts Boneca, responsable de l'unité Biologie et génétique de la paroi bactérienne à l'institut Pasteur, à Paris. Or cette infection virale offre aux bactéries un avantage non négligeable contre le système immunitaire humain.

Les chercheurs se sont intéressés aux gènes impliqués dans la biosynthèse des acides téichoïques. Chez certaines souches de staphylocoques dorés résistants à la méthicilline (SARM), ils ont découvert des gènes de phages, qui ont été intégrés à l'ADN des bactéries au cours d'une infection. Ces gènes codent une enzyme, TarP, qui ressemble beaucoup à une enzyme, TarS, produite par les staphylocoques dorés. Cette dernière a un rôle important dans la synthèse des acides téichoïques. Ces acides sont constitués de polymères, des ribitol phosphates, dans lesquels l'enzyme TarS transfère un monosaccharide (N-acétylglucosamine ou NAG) sur le quatrième carbone du ribitol. Avec TarP, le transfert de NAG se fait sur le troisième carbone.



orsque de l'ADN de phage s'insère dans celui du staphylocoque doré, ce dernier produit les enzymes TarP (au lieu des enzymes TarS) qui modifient la structure des acides téichoïques de la membrane. La bactérie n'est alors plus reconnue par les anticorps du système immunitaire

16 %

TELLE EST LA PROPORTION DES INFECTIONS NOSOCOMIALES CONTRACTÉES À L'HÔPITAL DUES AU STAPHYLOCOQUE DORÉ. GLOBALEMENT, LES INFECTIONS NOSOCOMIALES TOUCHENT UN PATIENT SUR VINGT.

Source : J. Gerlach

Ce détail a toute son importance pour la reconnaissance immunitaire. Chez la souris, les chercheurs ont montré que les acides téichoïques dont la structure résulte de l'action de TarP sont moins susceptibles de déclencher une réponse immunitaire. L'équipe a aussi constaté que seule une faible part d'anticorps humains anti-*S. aureus* cultivés *in vitro* se lient aux acides téichoïques formés par l'action de TarP. Les souches de *S. aureus* exprimant cette enzyme sont moins susceptibles d'être détectées et éliminées par le système immunitaire.

Les chercheurs espèrent que cette découverte permettra de mettre au point un inhibiteur de TarP, afin de rendre les SARM plus visibles au système immunitaire. « Cependant, l'empêcher Ivo Gomperts Boneca, TarS et TarP sont très proches l'une de l'autre par leur structure et leur mode d'action. Cela risque d'être très difficile de mettre au point des inhibiteurs qui inhibent TarP sans inhiber aussi TarS. » Mais étant donné l'urgence de trouver des parades aux résistances aux antibiotiques développées par les bactéries, toutes les pistes doivent être explorées. ■

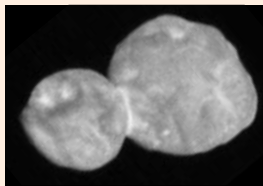
ALINE GERSTNER

D. Gerlach et al., *Nature*, vol. 563, pp. 705-709, 2018

RENDEZ-VOUS AVEC

Après son survol historique de la mission

En 2019, la sonde New Horizons a poursuivi sa route aux confins du Système solaire. Le 1^{er} janvier 2019, elle est passée à 3 500 kilomètres de l'Ultima Thulé, un petit corps de la ceinture de Kuiper. Les photos prises par la sonde révèlent un objet de 33 kilomètres de long. Sa forme le rattache à la famille des petits corps binaires à contact, près de la rencontre de deux objets solides, à l'instar de la comète 67P/Tchouroumov-Guérassimenko.



LITTLE FOOT ENFIN DÉGAGÉ

Plus connu par son surnom Little Foot.

StW 573 est un squelette d'australopithèque découvert à Sterkfontein, en Afrique du Sud.

L'équipe de Ron Clark, de l'université du Witwatersrand, a travaillé pour le dégager millimètre par millimètre de son bloc de sédiment. Résultat : 97% d'un squelette vieux de 3,67 millions d'années, le seul australopithèque aussi complet que nous avons !

Que nous apprend-il à ce stade ? L'équipe de Robin Crompton, de l'université de Liverpool, vient de livrer une étude de son anatomie fonctionnelle. Ces chercheurs ont constaté que les omoplates et les articulations des membres de StW 573 sont proches de celles d'*Australopithecus afarensis* (Lucy), et que l'articulation de sa main est distincte de celle d'*A. africanus*, lui aussi découvert à Sterkfontein. Cela va dans le sens de Ron Clark, qui voit dans cet individu probablement féminin, aux jambes plus longues que les bras, une représentante d'*A. prometheus*, une espèce distincte d'*A. africanus*. Ouoi qu'il



Le fossile Little Foot, avant qu'il ait été complètement dégagé. C'est une probable australopithèque.

En soit, d'après les dents et la bipédie probable de Little Foot, certains chercheurs y voient une forme préhumaine ; d'autres y voient plutôt un descendant d'*A. sediba*, découvert non loin de Sterkfontein. Nul doute que la discussion sur StW 573 va s'intensifier maintenant que ce fossile est dégagé. ■

P.S.

R. H. Crompton et al., prépublication en ligne, bioRxiv, 29 novembre 2018.

{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

CONFÉRENCES / DÉBATS

L'anthropologie de la transmission, par-delà nature et culture

Jeudi 7 février - 18h : L'art au service de la reconnexion de l'esprit humain aux intelligences du vivant
 Romain Simenel, ethnologue et anthropologue, chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

CYCLE ACTU DANS LE CADRE DE L'EXPOSITION MILLE & UNE ORCHIDÉES

Le Muséum propose deux rendez-vous autour de l'exposition *Mille et une orchidées*, du 14 février au 11 mars, aux Grandes Serres du Jardin des Plantes.

Chercheurs d'orchidées, de l'observation à la protection

Samedi 16 février - de 10h à 18h
 En lien avec la Société Française d'Orchidophilie (SFO), le Muséum propose une journée dédiée aux recherches sur les orchidées.
 L'inventaire de la biodiversité des orchidées
 Les orchidées et leurs alliés vivants
 Comment protéger les orchidées ?

À la découverte des orchidées

Vendredi 18 février - 18h
 Émilie Picard, responsable de la collection Cactées et Aloès et co-responsable de la collection Orchidées à l'Arboretum de Versailles-Chèvreloup, Muséum

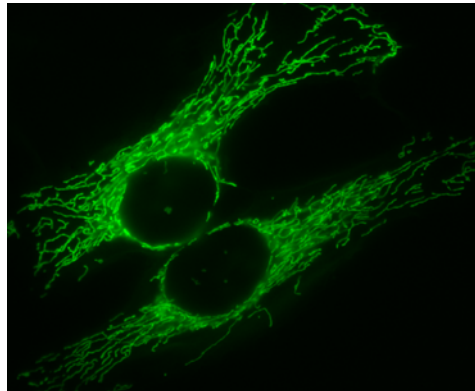


GENETIQUE

MITOCHONDRIES HÉRITÉES DU PÈRE

Chez un individu sain, chaque cellule contient des centaines de mitochondries (voir ci-contre), qui portent toutes le

En séquençant son ADN mitochondrial, ils ont montré que deux versions du génome mitochondrial y coexistaient. Et en faisant de même chez les membres de sa famille, ils ont observé qu'une partie de l'ADN mitochondrial du garçon provenait de son grand-père maternel: la mère du garçon avait hérité d'une partie de l'ADN mitochondrial de son propre père et l'avait transmise à son fils. Poursuivant leur enquête dans cette même famille et dans deux autres, les généticiens ont ainsi identifié neuf individus dont l'ADN mitochondrial provenait à la fois de leur père et de leur mère.



Les mitochondries (en vert, autour des noyaux de deux cellules), les usines énergétiques des cellules, portent leur propre génome, issu de la mère chez l'humain.

« Cette transmission partielle de l'ADN mitochondrial paternel reste cependant très rare et est clairement la cause de maladies », commente Nina Entelis, de l'unité Génétique moléculaire, génomique et microbiologie (université de Strasbourg, CNRS), spécialiste de la génétique mitochondriale. Cela ne remet donc pas en cause les études qui utilisent l'ADN mitochondrial pour, par exemple, déterminer l'ascendance de vestiges humains du Paléolithique. En revanche, elle offre une nouvelle piste de recherche sur les maladies mitochondriales. ■

M.-N. C.

Y. Luo et al., PNAS, vol. 115(51), pp. 13039-13044, 2018

ASTROPHYSIQUE

AUX ORIGINES DE LA TERRE

On a proposé trois hypothèses pour décrire les conditions de la formation de la Terre: la planète s'est formée rapidement, en quelques heures, à partir d'un nuage de gaz et de poussières encore présente; ou plus lentement, par aggrégation de blocs rocheux; ou, dans un scénario intermédiaire, en incorporant des poussières irradiées par le Soleil. Selon le scénario, les proportions des différents isotopes de néon incorporés dans le matériau terrestre diffèrent.

Curtis Williams et Sujoy Mukhopadhyay, de l'université de Californie à Davis, ont analysé le rapport isotopique du néon 20 et 22 dans des roches issues du manteau terrestre pour les comparer à des rapports isotopiques représentatifs des trois scénarios. Les particules du vent solaire indiquent le rapport isotopique de la nébuleuse solaire primordiale, des poussières



Les planètes se sont formées dans la nébuleuse solaire primitive. Mais dans quelles conditions ?

radiées provenant d'échantillons de roche lunaire donnent le rapport pour le scénario intermédiaire, et les chondrites carbonées, des météorites anciennes, donnent le rapport dans le cas du scénario lent. Les chercheurs trouvent un rapport comparable à celui de la nébuleuse, mais la question est loin d'être tranchée. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

J. Williams et S. Mukhopadhyay, *Nature*,
vol. 565, pp 78-81, 2019

EN BREI

PHOTOSYNTHESE AMÉLIORÉE

- armilles organismes
- photosynthétiques,

aux fins de type C_3 , tels que le blé, le soja ou le riz, ont une photosynthèse moins efficace que ceux de type C_4 . En cause : une enzyme, RuBisCO, qui réagit parfois avec le dioxygène au lieu du dioxyde de carbone. Cette réaction produit alors des composés toxiques dont l'élimination demande de l'énergie à la plante. Paul South, de l'université de l'Illinois, aux États-Unis, et ses collègues ont modifié génétiquement des plants de tabac de façon à améliorer cette élimination. Résultat : un tabac dont le rendement en champ est augmenté de 40 %.

**NOUVELLE SOURCE
DE SUBSAITS RADIO**

le radiotelescopio
canadien Chime

Canada (an hydrogen intensity mapping experiment) inauguré en 2017 a pour mission de traquer les sursauts radio rapides. L'origine de ces brèves bouffées d'ondes radio reste inconnue. Plus étonnant, on ne connaissait qu'une seule source périodique, émettant de façon régulière les bouffées radio. Grâce à Chime, Mandana Amiri, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, et ses collègues ont découvert une deuxième source périodique. De quoi collecter plus d'indices sur ce phénomène.

GREFFE D'UTERUS RÉUSSIE

Malgre une maladie congénitale qui la

Un couple brésilien, une femme, a accouché d'une petite fille en décembre 2017 grâce à la transplantation d'un utérus provenant d'une donneuse décédée. Dani Eijzenberg, de l'université de São Paulo, au Brésil, et ses collègues ont présenté les détails de cette première mondiale dans les autres cas de greffe d'utérus, les donneuses étaient vivantes). Bonne nouvelle : l'enfant et la mère sont en bonne santé.

TECHNOLOGIE

MIEUX PLACER LES ÉOLIENNES

Dans une ferme comprenant plusieurs dizaines d'éoliennes, quelle est la meilleure façon de disposer ces der-

rière d'une autre peut perdre jusqu'à 50% de son rendement? Johan Meyers, de l'université catholique de Louvain, en Belgique, et ses collègues ont apporté des éléments de réponse en reconstituant à petite échelle un parc éolien dans une soufflerie, les éoliennes étant simulées par 100 modèles réduits et adaptés.

Les chercheurs ont testé 56 configurations jouant sur l'alignement des éoliennes et la distance entre les rangées. Ils confirment que des turbines alignées ont un mauvais rendement du fait des turbulences. Néanmoins, certaines configurations assez rapprochées profitent d'un effet bénéfique de ces mêmes turbulences. ■

S.B.

J. Bossuyt et al., *Physical Review Fluids*, vol. 3, article 124603, 2018.

BIOLOGIE

UN INVERTÉBRÉ À L'IMMUNITÉ PRESQUE HUMAINE



Lorsque deux colonies de botrylles étoilées (*Botryllus schlosseri*) se rencontrent, leurs systèmes immunitaires peuvent s'attaquer suivant un mécanisme qui rappelle

celui des cellules souches hématopoïétiques humaines.

Les ascidies sont considérées comme les invertébrés actuels les plus proches des vertébrés. Parmi elles, le botrylle étoilé est un modèle pour comprendre comment le système immunitaire humain s'est mis en place au cours de l'évolution. Benjamin Rosental, de l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues viennent de montrer que le système immunitaire de cet animal marin vivant en colonies présente de nombreux points communs avec celui des vertébrés et donc de l'homme.

Les chercheurs ont noté des ressemblances avec des cellules souches hématopoïétiques humaines, un type de cellules souches à l'origine de toutes les lignées de cellules sanguines et notamment toutes celles du système immunitaire. De façon encore plus étonnante, les chercheurs ont montré que certains groupes de cellules constituent bien des cellules souches capables de se différencier en un grand nombre de cellules différentes et surtout que ces cellules souches sont présentes dans une niche qui rappelle la moelle osseuse humaine.

Ce ne sont pas les seuls points communs. Chez les vertébrés, des protéines exprimées à la surface des cellules permettent au système immunitaire de différencier le «soi» du «non-soi». Si les cellules ne sont pas reconnues, les cellules NK (pour *natural killers*) interviennent pour éliminer les intrus. C'est le problème que l'on rencontre par exemple lors d'un rejet de greffe. Chez les ascidies, les colonies formées d'individus tous semblables génétiquement peuvent, lorsqu'elles touchent des congénères d'une autre colonie, soit fusionner, soit se détruire l'une l'autre. Or le mécanisme qui déclenche la réaction des botrylles étoilés ressemble à celui des cellules NK des vertébrés. C'est la première observation d'un tel mécanisme chez des invertébrés. ■

NOËLLE GUILLON

B. Rosental et al., *Nature*, vol. 564, pp. 425-429, 2018.

NEUROSCIENCES

SOMMEIL ET AFFLUX SANGUIN

Pour mieux comprendre les fonctions du sommeil, et notamment du sommeil paradoxal, Antoine Bergel, de Sorbonne

Université, a utilisé une méthode d'imagerie fonctionnelle ultrasonore afin d'étudier l'activité vasculaire au cours du sommeil naturel tout en observant l'activité cérébrale par électroencéphalographie.

Chez le rat endormi, les chercheurs ont ainsi mis en évidence une hyperactivité vasculaire durant le sommeil paradoxal, non observée dans les autres phases de sommeil. Les chercheurs suggèrent qu'un type de signaux électriques, les ondes cérébrales gamma, dans l'hippocampe, contrôleraient le débit vasculaire de l'ensemble du cerveau pendant le sommeil paradoxal. Ces poussées vasculaires seraient peut-être liées au fait que le rat «rejoue» une activité réalisée pendant la phase de veille. Extrapoler ces résultats sur l'homme serait prématuré: il n'est pas certain que de telles poussées vasculaires correspondent à la physiologie du sommeil humain. ■

S.B.

A. Bergel et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 5364, 2018.

VIROLOGIE

ÉLIMINER LES RÉSERVOIRS DU VIH EN MODULANT LE MÉTABOLISME

Le virus du sida persiste dans certaines cellules des personnes infectées, ce qui empêche leur guérison. Une piste pour les détruire serait d'agir sur leur métabolisme.

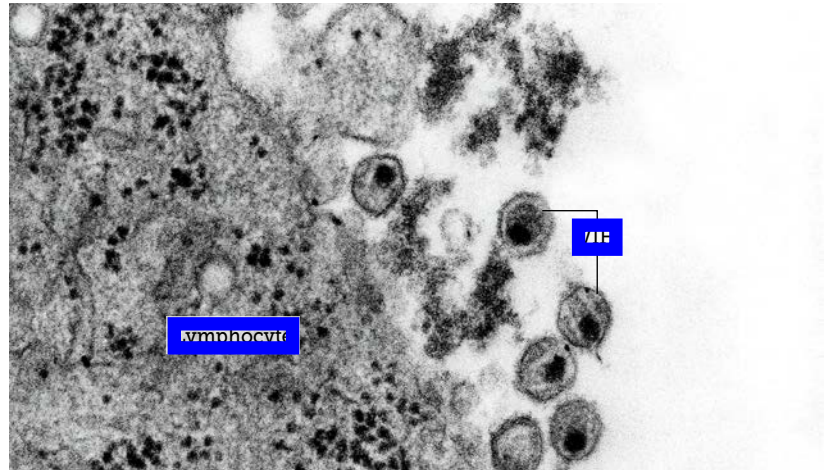
Si les traitements utilisés actuellement contre le sida – des combinaisons d'antirétroviraux – empêchent le virus du sida (VIH) de se répliquer, ils n'éliminent pas les cellules infectées. Or le VIH est capable de rester en dormance dans des cellules

virales prêtes à se répliquer dès l'arrêt du traitement. La recherche d'un moyen d'éliminer ces réservoirs est donc une voie très explorée dans la lutte contre le sida. C'est dans ce cadre qu'une équipe franco-canadienne, sous la direction d'Asier Sáez-Cirión, de l'institut Pasteur, à Paris, a mis en évidence le rôle clé du métabolisme des cellules non seulement dans leur susceptibilité à l'infection, mais aussi dans leur aptitude à persister en tant que réservoirs.

Le VIH infecte en priorité des cellules du système immunitaire, les lymphocytes T CD4+, qui semblent constituer ses principaux réservoirs. Toutefois, la description des cellules qui restent infectées dans l'organisme malgré le traitement a révélé que, parmi ces lymphocytes, certains ont moins de risque de devenir des réservoirs. C'est le cas des lymphocytes T CD4+ naïfs – des cellules qui n'ont pas encore été confrontées à une invasion pathogène et n'ont donc pas appris à en reconnaître. Les réservoirs sont principalement des lymphocytes T CD4+ à mémoire, qui ont appris à s'activer très vite en cas d'attaque par un agent pathogène déjà rencontré.

Par ailleurs, depuis les années 1990, on sait que les lymphocytes T CD4+ activés, c'est-à-dire déjà en état d'alerte quand l'infection au VIH se produit, sont davantage susceptibles d'être infectés. Toutefois, là encore, certaines sous-populations paraissent plus sensibles, comme si le programme spécifique de chaque cellule influait sur la capacité du virus à l'infecter.

Pour en savoir plus, Asier Sáez-Cirión et ses collègues se sont intéressés au rôle du métabolisme des cellules (les activités qui transforment certaines molécules en énergie) dans leur susceptibilité à l'infection au VIH. En effet, alors que les lymphocytes T CD4+ naïfs ont un faible métabolisme, leur activation augmente drastiquement celui-ci. L'équipe a d'abord infecté des lymphocytes T CD4+ purifiés à partir de



Le virus du sida infecte préférentiellement les cellules immunitaires à fort métabolisme.

36,9

MILLIONS
DE PERSONNES
DANS LE MONDE
VIVENT ENCORE
AUJOURD'HUI AVEC
LE SIDA, SELON
L'ORGANISATION
MONDIALE
DE LA SANTÉ.
EN 2017,
940 000 SONT
MORTES D'UNE
COMPLICATION
LIÉE À CETTE
MALADIE.

donneurs non infectés. Elle a ainsi montré que plus les lymphocytes étaient expérimentés, plus le VIH était susceptible de les infecter: les lymphocytes naïfs résistaient bien, mais plus ceux à mémoire s'étaient spécialisés, moins ils résistaient. Et ceux qui résistaient le mieux avaient le métabolisme le plus bas. Par ailleurs, si l'activation des lymphocytes augmentait le risque d'infection, plus les cellules étaient expérimentées, plus le risque d'infection était élevé. Et de nouveau, ce risque était corrélé avec leur activité métabolique. Les chercheurs se sont assurés que l'activité métabolique était une cause et non une conséquence de l'infection. Le VIH infecterait donc en priorité les cellules à forte activité métabolique, plus aptes à lui fournir l'énergie et les composants dont il a besoin pour se répliquer.

En inhibant l'activité métabolique de ces cellules, parviendrait-on à éliminer les réservoirs? C'est ce que suggère une expérience préliminaire de l'équipe: en présence d'inhibiteurs métaboliques, non seulement les lymphocytes T CD4+ pré-infectés par le VIH sont préférentiellement éliminés, mais l'amplification du virus à partir de réservoirs issus de patients sous traitement antirétroviral est stoppée. Reste à savoir si un tel traitement fonctionnerait contre le sida en conditions réelles. ■

M.-N. G.

A. C. Valle-Casuso et al., *Cell Metabolism*, en ligne le 20 décembre 2018.

post-vérité et infox : où allons-nous ?

colloque accès gratuit

jeudi 7 février
— 19h

vendredi 8 février
10h — 18h

cite

sciences
et industrie

Grâce aux algorithmes, aux données de masse et aux puissances de calcul, l'intelligence artificielle imprègne déjà notre vie quotidienne et change nos habitudes. Elle permet de « survivre à la mort », de nous orienter vers la « bonne » filière étudiante ou le « bon » emploi, de mieux détecter certains cancers.

Colloque organisé sous la responsabilité scientifique de Michel Wieviorka, président de la Fondation Maison des sciences de l'Homme (FMSH), directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS).

7 février
— 19h

Soirée d'ouverture

avec notamment :

Jean-Marie Cavada, journaliste et député européen ;
Bruno Maquart, président d'Universcience ;
Élisabeth Roudinesco, psychanalyste ; Michel Wieviorka

8 février
— 10h

Introduction au colloque

par Michel Wieviorka

Quels biais cognitifs à l'œuvre ?

par Jean-Pierre Dozon, anthropologue, IRD, EHESS, FMSH

Éduquer ou légiférer ?

par Gérald Bronner, professeur de sociologie, Académie des technologies et Académie nationale de médecine ;
Divina Frau-Meigs, sociologue des médias, professeur à l'université Sorbonne-Nouvelle.

8 février — 14h

La science à l'épreuve

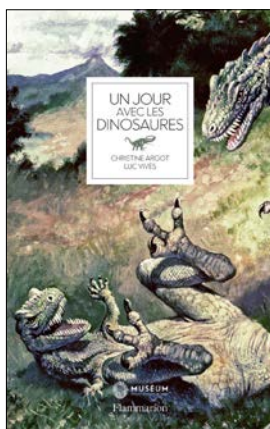
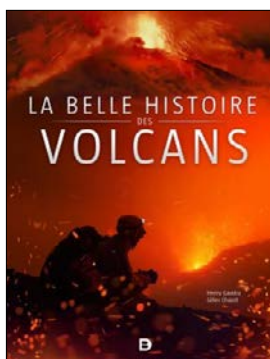
par Laëtitia Atlani-Duault, anthropologue, IRD, FMSH ;
Arnaud Mercier, professeur à l'université Paris II - Panthéon-Assas ; directeur de l'IFP.

avec Ghislaine Azemard, professeure en sciences de l'information et de la communication, UNESCO, FMSH ;
Jean-Gabriel Ganascia, philosophe, Paris-Sorbonne-Université. Comité d'éthique du CNRS.

8 février — 16h

L'information au temps de la désinformation

Antonio Casilli, sociologue, EHESS ; Christophe Deloire, Reporters sans frontières ; Ioana Manolescu, INRIA, CEDAR ;
Francesca Musiani, CNRS. Paris-Sorbonne universités.



HISTOIRE NATURELLE

L'AVENTURE DE LA BIODIVERSITÉ

Hervé Le Gouvello

Belin, 2018

272 pages, 16 euros

Ce beau livre va émerveiller tous les férus de voyages et d'histoire.

Un tour d'horizon de la biodiversité, par Hervé Le Gouvello, spécialiste de la biologie évolutive, montre une belle érudition et nous propose de suivre ces innombrables explorateurs et scientifiques qui, depuis près de trois mille ans, nous ont permis de découvrir la biodiversité. Car l'intelligence de cet ouvrage est d'évoquer les voyages d'abord sous l'angle de la faune et de la flore qu'ils ont contribué à décrire. Chaque chapitre du livre présente une expédition, parfois célèbre comme celles de Bougainville, de Cook ou de Darwin, ou bien moins connue, comme celles de Kaempfer, de Bartram ou de Welwitsch. Les textes sont riches en informations et on peut regretter qu'un index de noms ne complète pas celui des espèces présentées.

Il faut souligner le remarquable travail de Julien Norwood que l'on connaît pour ses illustrations d'ouvrages naturalistes et de jardinage. Précis et élégants, magnifiquement mis en couleurs, ses dessins donnent une très agréable impression d'homogénéité, ce que ne permet pas le recours aux gravures historiques qui ornent habituellement ce type de livres. Les légendes et les encadrés offrent une foule d'informations sur la biologie et l'écologie des espèces décrites, et l'on passe ainsi de la linaire au giroflier, de l'ornithorynque au cygne noir, du gobie colle-roche à l'alligator d'Amérique, du piranha de l'Orénoque au bison d'Amérique.

Même si le livre n'aborde pas vraiment la finalité sociale et politique de ces expéditions – elles ont contribué à l'essor du colonialisme européen –, il constitue un ouvrage utile car évocateur de la beauté d'une biodiversité connue grâce à des générations de scientifiques.

VALÉRIE CHANSIGAUD
CHERCHEUSE ASSOCIÉE
AU LABORATOIRE SPHERE, PARIS

SCIENCES DE LA TERRE

LA BELLE HISTOIRE DES VOLCANS

Henry Gaudru et Gilles Chazot

De Boeck Supérieur, 2018

120 pages, 27 euros

Voilà un joli livre, facile et agréable à lire. Cette ode aux volcans met

évidemment en perspective l'histoire de la Terre depuis son origine, il y a 4,56 milliards d'années. L'objectif de l'ouvrage est clairement d'atteindre tous les publics, même si, à cette fin, les auteurs ont fait le choix de ne faire que survoler les problématiques. En ce sens, il s'inscrit dans une mouvance entamée par les Anglais, où la géologie s'affranchit de son vocabulaire abscons afin d'être immédiatement accessible. L'iconographie est remarquable. Elle provient pour la plus grande part de photographies récentes issues des plus grandes agences.

L'ouvrage est conçu comme une succession de fiches chronologiques organisées en cinq chapitres. Des encarts (zooms) indépendants proposent des éclairages thématiques complémentaires, qui mettent utilement en perspective la description des édifices volcaniques. Chaque fiche est organisée autour d'une image en pleine page et d'un texte explicatif. L'ensemble des 140 fiches a l'intérêt insigne de faire découvrir au lecteur des objets volcaniques souvent méconnus. Bien sûr, le lecteur expert regrettera que certains thèmes aient été passés sous silence, tels le volcanisme lunaire, l'ascension du magma, les dykes, les nodules de péridotites remontant du manteau supérieur ou encore les ophiolites... Cette invitation au voyage planétaire ignore aussi le volcanisme australien et chinois. Mais était-il possible d'être exhaustif sur un sujet aussi riche ?

Bien qu'il soit publié dans une série «supérieure», cet ouvrage relève en réalité de la vulgarisation. Il intéressera le jeune lectorat des néophytes tout autant que les inconditionnels de la volcanologie.

MICHEL DETAY
GÉOLOGUE

BIG BANG

Jean-Philippe Uzan

Flammarion, 2018
104 pages, 21 euros

Tout le monde a déjà entendu parler du Big Bang. Cette expression, devenue une mode, est couramment utilisée dans la bande dessinée, à la télévision ou même en politique. Mais que désigne-t-elle exactement? L'auteur répond en nous parlant de l'Univers et de son histoire afin de nous aider à saisir la genèse de ce modèle scientifique.

En science, chacun sait que la notion de Big Bang a un rapport avec l'Univers et que des grands noms y sont attachés, dont Einstein, Hubble et bien d'autres. La cosmologie a montré que l'Univers n'a pas toujours été comme nous le voyons dans notre voisinage spatiotemporel et que, dans un passé lointain, il a été plus dense et plus chaud. On peut même lui attribuer un âge de 13,7 milliards d'années. Mais que signifie une telle affirmation? Implique-t-elle que l'Univers a une origine? En nous parlant de l'espace, du temps et de l'origine de la matière, le modèle du Big Bang se trouve à la frontière entre la physique et la philosophie, avec un soupçon de métaphysique. Cela tient aussi au fait que la cosmologie a un statut particulier: nous n'avons qu'un seul Univers à observer à l'intérieur duquel nous sommes «coincés» et nous le faisons depuis un seul point de l'espace-temps! Dès lors, comment séparer ce qui est universel de ce qui dépend de notre point de vue?

L'auteur affronte toutes ces questions difficiles en détaillant les hypothèses et les observations sur lesquelles repose ce modèle et nous explique avec pédagogie et profondeur les subtilités de cet extraordinaire échafaudage bâti tout au long du xx^e siècle. Alors que les observations cosmologiques sont toujours plus nombreuses et plus précises, il est en effet essentiel de séparer les questions auxquelles la cosmologie peut répondre de celles qui ne sont pas encore réglées. Ce livre magistral nous y aide. Il est à la hauteur de ses ambitions, qui sont... cosmiques!

ROLAND LEHOUCQ
ASTROPHYSICIEN AU CEA-SACLAYUN JOUR AVEC
LES DINOSAURES

Christine Argot et Luc Vivès

Flammarion/MNHN, 2018
124 pages, 29,90 euros

Enfin un livre sur les dinosaures qui rompt avec le format des

meilleurs livres de la jeunesse pour les lecteurs! Dans cet ouvrage, les auteurs prennent pour point de départ divers dinosaures présentés dans la galerie de paléontologie du Muséum national d'Histoire naturelle pour explorer l'image des dinosaures au fil du temps, depuis que Richard Owen proposa ce nom scientifique à succès en 1842.

Chacun des spécimens (souvent des moulages) fait l'objet d'un bref essai mêlant la paléontologie à l'histoire des sciences et l'on aurait tort de négliger ces petits textes, parsemés de citations littéraires, au seul profit des superbes illustrations qui caractérisent ce livre. Les photos d'Eric Sander mettent en valeur le charme *Art nouveau* de la galerie de paléontologie autant que l'aspect spectaculaire des fossiles qu'elle renferme. Elles s'accordent harmonieusement avec les nombreuses autres images, aux sources les plus variées: reconstitutions scientifiques, souvent d'un autre temps, affiches de cinéma, couvertures de magazines, photographies anciennes...

Car les dinosaures ont souvent inspiré des artistes, qu'il s'agisse des grands maîtres du «paléoart» que furent l'Américain Charles R. Knight et le Tchèque Zdeněk Burian, auxquels des chapitres sont consacrés, ou d'illustrateurs bien moins connus, voire anonymes, qui ont souvent laissé libre cours à leur imagination, avec des résultats parfois plutôt pittoresques. Sous son élégant coffret cartonné, ce très beau livre nous invite à réfléchir à ce qu'est la reconstitution paléontologique.

ERIC BUFFETAUT
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE, ENS. PARISSUR LES PAS DE LUCY
Raymonde BonnefilleOdile Jacob, 2018
168 pages, 23,90 euros

Dans ce superbe livre, l'une des actrices des grandes expéditions américaines et françaises des années 1970 raconte la vie de spécialiste des flores anciennes qu'elle a menée. Son passionnant récit nous fait rencontrer leurs acteurs célèbres, tels Richard et Meave Leakey, Yves Coppens, Clark Howell et bien d'autres, mais aussi la vallée de l'Omo et les rives du lac Turkana, leurs habitants, leurs milieux naturels alors moins privés de leurs animaux sauvages... Le ton modeste et la plume élégante de l'auteure ne mettent pas en exergue un point évident pour les préhistoriens: en restituant les faunes fossiles d'Afrique de l'Est, elle a joué un rôle scientifique majeur dans ces grandes découvertes.

PARIS EN 1200
Denis HavotCNRS Editions, 2018
128 pages, 29 euros

Qui sait que la réfection du Paris du $xiii^e$ siècle par le roi Philippe Auguste a eu des conséquences durables? L'auteur présente le dossier historique, architectural et archéologique de cette recreation de la capitale française. Il mène des comparaisons avec les constructions de l'époque afin de mieux faire comprendre l'importance des détails architecturaux discutés. Des plans, les photographies et les aquarelles toujours impressionnantes de Jean-Claude Golvin complètent l'ensemble.

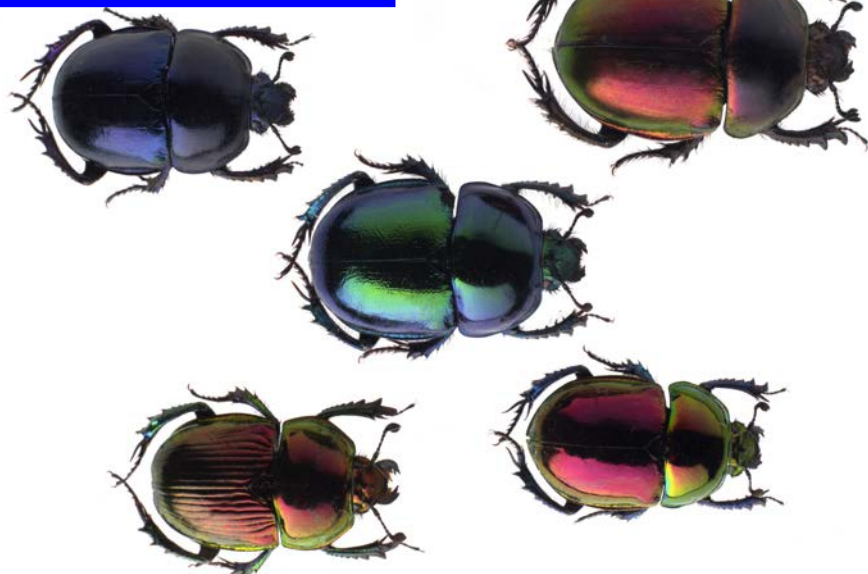
LA NANO REVOLUTION
Azar Khalatbari, avec Jacques JupilleQuae, 2018
52 pages, 10 euros

Nano, mot galvaudé! Qu'en est-il de la promesse qu'il symbolise? Comment nous rend les crises depuis le xx^e siècle? Entourée d'experts de la question, l'auteure passe en revue toutes les «Lilliputiens» et examine leurs applications, leur nocivité éventuelle, la législation qui les entoure, etc. Au fil d'un discours nuancé et équilibré, elle montre que les innovations fondées sur des nanotechnologies ou incorporant des nanoparticules sont porteuses de grandes promesses de progrès ou de grandes menaces potentielles. De quoi se faire une opinion ou, au moins, mieux savoir.

LYON

JUSQU'AU 28 JUIN 2020
Musée des Confluences
www.museedesconfluences.fr

Coléoptères



Les coléoptères valent bien une exposition : avec près de 400 000 espèces recensées, ce groupe d'insectes représente presque le tiers de tous les animaux. Tout autre groupe animal ou végétal n'atteint une telle diversité, qui se manifeste tant sur le plan morphologique que sur le plan comportemental. Qui plus est, nombre de coléoptères sont des « insectes-bijoux », aux motifs et couleurs merveilleux. De ce fait, ils suscitent la passion de

collectionneurs et sont utilisés comme matière première par certains artistes. Par ailleurs, les relations qu'entretient l'humanité avec ces insectes sont aussi très variées : ennemis ou alliés des cultures agricoles, aliments d'appoint sous forme de larves, animaux de compagnie ou de jeu, remèdes traditionnels, symboles... Tous ces aspects sont abordés dans l'exposition, qui montre spécimens, documents historiques, objets ethnographiques et œuvres d'art. ■

PARIS

JUSQU'EN JUIN 2019
Espace des sciences Pierre-Gilles de Genne
www.espn.org

Sous influences, la science du choix



De quoi dépendent les choix que nous faisons ? Comment les faire ? Ainsi pourrait-on résumer le propos de cette exposition, qui décline de façon interactive le thème en trois volets : l'aspect biologique avec le cerveau et les influences des hormones, de l'intestin, etc., le rôle de la société et de la place qu'on y occupe, et les algorithmes qui décident... à notre place ! ■

VILLERS-LES-NANCY

JUSQU'AU 9 MARS 2019
Bibliothèque universitaire Sciences et technique
<http://bu.univ-lorraine.fr>

De l'Homo numericus au citoyen numérique



Cette exposition (itinérante) vise à familiariser le visiteur avec les concepts fondamentaux de l'informatique, les principaux personnages qui ont façonné ce domaine, les applications et ses enjeux sociétaux. Le tout à l'aide d'animations ludiques (un robot humanoïde, des jeux de logique, une visite virtuelle avec casque immersif...). ■

ET AUSSI

Mardi 5 février, 17 h
Acad. des sciences, Paris
academie-sciences.fr
GÉOMÉTRIES EN ACTION
Le mathématicien et académicien Étienne Ghys, vulgarisateur de talent, propose une promenade dans le monde de la géométrie à travers quelques exemples de recherches et ses expériences personnelles.

Vendredi 7 février, 18 h
Campus Joseph Aiguier, Marseille
provence-corse.cnrs.fr/
APPRENTISSAGE DE LA LECTURE
Liliane Sprenger-Charolles, directrice de recherche émérite du CNRS au laboratoire de psychologie cognitive, explique les acquis de la recherche sur ce thème qui soulève des questions.

Vendredi 7 février, 18 h
La Turbine sciences, Annecy
www.univ-smb.fr/amphis
LES HUMANITÉS ANCIENNES EN COULEUR
Une conférence d'Émilie Chalmin et Hélène Salomon sur les utilisations des matières colorantes par les anciennes populations humaines. Également le 5 février à Chambéry et le 22 à Thonon-les-Bains.

Vendredi 8 février, 20 h 30
Les Champs Libres, Rennes
www.espace-sciences.org
MACHINES MOLÉCULAIRES
Une conférence de Jean-Pierre Sauvage, Prix Nobel de chimie en 2016, sur les moteurs moléculaires mis en œuvre dans le vivant, nanomachines que les chimistes commencent à imiter.

Mercredi 20 février, 18 h 30
BnF François-Mitterrand, Paris
www.bnf.fr
LES GRAPHES, UN AUTRE UNIVERS EN EXPANSION
Un exposé d'Emmanuel Kowalski, mathématicien à l'ETH-Zurich, sur les graphes expansifs, les objets combinatoires remarquables.

NEUCHÂTEL (SUISSE)

JUSQU'AU 18 AOÛT 2019

Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel
www.museum-neuchatel.ch

Pôles, feu la glace

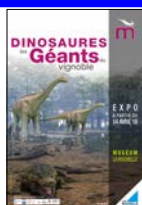


Parrainée par le glaciologue Claude Lorius, cette exposition invite ses visiteurs à un voyage dans le froid polaire du Nord et du Sud, où ils découvriront notamment les conditions physiques, voire sociales. La science du climat est bien sûr présente, avec les préoccupations associées au réchauffement en cours. D'ailleurs, le Muséum expose en vitrine les convictions à ce sujet de 67 personnes, connues ou non, qui ont répondu à son appel. À noter aussi: un film immersif et une expérience sonore de rupture de glacier, réalisés par Luc Jacquet.

LA ROCHELLE

JUSQU'AU 1^{ER} SEPTEMBRE 2019

Muséum La Rochelle
<https://museum.larochelle.fr>



Dinosaures, les géants du vignoble

Il y a 140 millions d'années, le nord de l'Aquitaine était une région de marécages, de lagunes et de cours d'eau où vivaient des animaux variés, dont des dinosaures. Ces sites ont livré de nombreuses découvertes paléontologiques depuis le début des années 2000, qui sont en partie présentées ici au public. L'exposition explique aux visiteurs l'histoire géologique de la région, présente les sites paléontologiques charentais et la façon dont une fouille se déroule, décrit la faune et la flore associées...

SORTIES DE TERRAIN

samedi 2 février, 14 h
Lattes (Hérault)
Tél. 04 67 78 76 24
herault.lpo.fr

LOUTRES

La loutre d'Europe est de retour dans l'Hérault et recolonise petit à petit ses anciens territoires. Une projection et une formation à la reconnaissance des indices de la présence de cet animal sont proposées.

Mardis 12 et 26 février, 14 h 30
Vains (Manche)
Tél. 02 33 89 06 06

PRÉS-SALÉS

Un animateur de l'écomusée de la baie du Mont-Saint-Michel vous fait découvrir ce milieu périodiquement recouvert par la mer, sa faune et sa flore, sa formation, les activités humaines.

samedi 16 février, 9 h 30
Lameau de Boigny, Méréville (Essonne)
Tél. 01 60 91 97 34

MÉRÉVILLE PLAGE

Le temps d'une matinée, visite guidée du site du Moulin des Cailles et de son patrimoine géologique qui comprend galets, sables fins et figures sédimentaires datant de 30 millions d'années.

Dimanche 17 février, 15 h
Jerneuil-sur-Vienne (87)
Tél. 05 55 48 07 88
www.lne-asso.fr

LES PLANTES EN HIVER

Une excursion de deux heures pour comprendre comment les plantes à fleurs, dont les arbres et arbustes, passent l'hiver. En n'oubliant pas quelques autres plantes telles que lichens et mousses.

Jeudi 21 février, 21 h
Ferrières-en-Brie (77)
Tél. 01 60 28 03 04
benard-nature-environnement.fr

MIGRANTS AMPHIBIENS

À la fin février, s'il ne fait pas trop froid, les amphibiens se mettent en mouvement. Cette sortie propose de les observer à l'étang de la Taffarette.

PARIS

JUSQU'AU 4 AOÛT 2019

Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr

Microbiote

Depuis quelques années, les scientifiques découvrent que les bactéries vivant dans notre système digestif jouent un rôle crucial pour notre santé physique et même mentale. C'est assurément l'une des principales avancées récentes en biomédecine, et on comprend que la Cité des sciences et de l'industrie ait voulu y consacrer une exposition.

Pour ce faire, le musée a choisi de s'appuyer sur le succès de librairie *Le Charme discret de l'intestin*, paru en français en 2015. Ses auteures, Giulia et Jill Enders ont ainsi participé à la conception de l'événement, et les dessins amusants de Jill Enders ont acquis des versions 3D.



Il en résulte une exposition ludique, où l'humour est bien présent et la fausse pudeur absente, qui apporte une foule d'informations sur le système digestif – de son anatomie jusqu'à la façon appropriée de déféquer –, sur son microbiote (terme plus scientifique que flore intestinale, car il ne s'agit pas de végétaux), sur la façon dont les chercheurs l'étudient, sur ce qu'il faut faire pour préserver un bon microbiote, etc.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

« IT FROM BIT », LA MATIÈRE REPENSÉE

Selon certaines idées au confluent de l'informatique
et de la physique, l'information immatérielle donnerait
naissance à la matière



À partir
d'information
pure, il est
possible de
définir une notion
qui correspond
à la matière
qui nous est
familière.

Depuis des siècles, l'humanité s'est interrogée sur ce qui, de la matière et de l'esprit, est premier. Une nouvelle question, sans doute assez différente, apparaît aujourd'hui: qu'est-ce qui est

L'idée la plus couramment admise est que la matière est première et que l'information est une configuration de la matière. Ainsi, nous pouvons mémoriser de l'information sur une page blanche en la constellant de petites taches d'encre, pour former les lettres par exemple. Dans ce cas, l'information a un support matériel, l'encre.

Mais ce lien entre matière et information peut être pensé autrement. Que signifie qu'un objet matériel, par exemple une goutte d'eau, est, à un certain moment, à un certain endroit? Dans la vision classique, cette goutte d'eau, qui existe indépendamment de l'espace, en occupe une portion. Une autre idée est que cette portion de l'espace a une propriété particulière, que nous pourrions nommer «humidité». La matière ne nous apparaît

plus comme un objet indépendant de l'espace, qui vient le remplir, mais comme une modification locale des propriétés de cet espace, et serait alors une information pure. Ce raisonnement a mené le physicien John Wheeler à proposer, en 1989, l'idée que l'information soit première et que la matière et les lois de la physique émergent dans un monde d'information, ce qu'il a résumé avec l'expression *it from bit*.

**La matière et les lois
de la physique
émergeraient dans
un monde d'information**

Mais comment, dans cette approche, la matière émerge-t-elle de l'information? L'exemple des automates cellulaires, définis dans les années 1940 par Stanislaw Ulam et John von Neumann, laisse entrevoir un début de réponse.

Un automate cellulaire est une grille de cellules, contenant chacune une quantité finie d'information, qui évolue au cours du temps, l'information contenue dans une cellule à un moment donné dépendant de l'information contenue, au moment précédent, dans les cellules voisines.

Par exemple, dans le «jeu de la vie», un automate cellulaire imaginé par John Conway, les cellules sont des carrés organisés en damier. Chaque cellule contient un bit d'information: elle est ou bien «habitée» ou bien «inhabitée» et son évolution est déterminée par l'état de ses huit cellules voisines. Une cellule inhabitée dont exactement trois cellules voisines étaient habitées, au moment précédent, devient habitée; et une cellule habitée, dont deux ou trois cellules voisines étaient habitées au moment précédent, le reste, sinon elle devient inhabitée.

Dans un tel automate cellulaire, le nombre de cellules habitées peut varier au cours du temps: l'information, contrairement à la matière, peut être recopiée à l'infini. Mais dans certains automates, le nombre de cellules habitées peut être constant. Si nous prenons, par exemple, une règle selon laquelle une cellule est habitée si la cellule située à sa gauche l'était au moment précédent et si, à un moment donné, la troisième cellule de la rangée est habitée et les autres non, alors, au moment suivant, la troisième sera inhabitée et la quatrième habitée, puis la cinquième, etc.

Dans un tel cas, il est tentant de dire que la troisième cellule est non seulement habitée, mais qu'elle est habitée par quelque «chose» et que cette chose s'est déplacée vers la droite. Cette loi de conservation fait donc émerger une chose qui se conserve et se déplace et que nous pourrions peut-être nommer «matière».

Ce glissement de la notion d'information a conduit à de nombreuses idées novatrices dans différentes disciplines. Ce qui montre, une fois de plus, combien les sciences s'inspirent les unes des autres et avancent de concert.

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

Géographes, biologistes, généticiens
étudient ces migrations qui refaçonnent
les cartes du vivant.

5 février

Femmes et hommes en mouvement

avec Camille Schmoll, géographe, chercheuse
à l'université de Paris-Diderot.

12 février

Dans le sillage des baleines

avec Olivier Adam, bio acousticien, professeur
à l'université Pierre-et-Marie-Curie, chercheur
de l'université Paris Sud-Orsay.

19 février

Les forêts aussi migrent

avec Antoine Kremer, généticien, directeur
de recherches à l'unité mixte de recherches
Bioeeco à l'INRA.

DOSSIER
SCIENCE

cité

sciences
et industrie

humains, baleines, forêts, tracent la route

cycle de conférences accès gratuit

les mardis
— 19h

explique-moi le microbiote

projection-débat accès gratuit

jeudi 21 février
— 19h

cité

sciences
et industrie

Explique-moi le microbiote

Le microbiote rassemble les milliards
de bactéries qui nous peuplent.
Un film révèle ce monde plein
de promesses, qui fait de chacun
de nous un être unique !

Projection du documentaire
suivi d'un débat avec :

Joël Doré, INRA ; Anne-Christine Joly, hôpital
Saint-Antoine ; Philippe Langella, INRA ;
Harry Sokol, hôpital Saint-Antoine.

Modération : Anne Buisson, association
Francois-Aupetit (afa-Crohn-RCH).

DOSSIER
SCIENCE

Accès gratuit dans la limite des places disponibles

informations sur cite-sciences.fr



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LE JOUR SANS FIN DES OGM

Dans le contexte agricole, les organismes génétiquement modifiés font l'objet d'une suspicion *a priori*. Dès lors, établir la non-toxicité d'un OGM devient impossible.



Voyager dans le temps est un thème de fiction populaire. Nous avons tous en mémoire le film *Un jour sans fin*, où le personnage joué par Bill Murray, coincé dans une boucle tempo-

rielle, vit la même journée. Or l'histoire sociale des organismes génétiquement modifiés (OGM) nous projette dans une version éprouvante d'un tel jour sans fin. À chaque coup d'éclat médiatique, la suspicion du public à l'égard des OGM se renouvelle, voire se renforce.

Même si les enjeux socioéconomiques font des OGM une question politique, la défiance à leur égard reste alimentée par un sensationnalisme médiatico-scientifique. «Oui, les OGM sont des poisons!», titrait la une du *Nouvel Observateur* en septembre 2012, au moment de la publication des expériences de Gilles-Éric Séralini, de l'université de Caen, sur la toxicité chez les rats d'un maïs OGM résistant au glyphosate.

Cette affaire constitue un excellent modèle sociologique pour saisir les

ressorts de la confiance. Le public se souvient des photographies de rats envahis de tumeurs géantes et des gros titres des journaux à ce sujet. Mais il ne se souvient guère des travaux des agences de régulation qui ont, peu de temps après, invalidé l'étude de Gilles-Éric Séralini en raison de sérieux biais méthodologiques. Ni, probablement, que plusieurs études fiables et récentes (la dernière étant parue le 10 décembre 2018

**Confiance sociale
et preuve scientifique
n'évoluent pas
conjointement**

dans *Toxicological Sciences*, doi:10.1093/toxsci/kfy298) ont confirmé l'absence d'effets de ce maïs sur la santé.

La défiance est toujours là, ce qui illustre que confiance sociale et preuve scientifique n'évoluent pas conjointement. Le faible intérêt pour les nouvelles

«tranquillisantes» et les trains qui arrivent à l'heure ne suffit pas à expliquer l'irréductibilité de cette défiance. Pour en comprendre les mécanismes, il faut remonter à la découverte des ciseaux moléculaires de l'ADN que sont les enzymes de restriction, cheville ouvrière du génie génétique. Les produits résultant d'une découpe de l'ADN ont alors été qualifiés de génétiquement modifiés. Le berceau de la défiance se situe dans le fruit de ce baptême terminologique.

En effet, dans les années 1970, la génétique moléculaire décrivait la séquence l'ADN comme le composant élémentaire et suffisant des organismes vivants. Or malgré le fait que les recherches ultérieures ont montré que l'ADN est loin de déterminer à lui seul le vivant, les représentations populaires du génie génétique et son encadrement réglementaire sont restés arrimés à ce paradigme simplificateur.

Les outils du génie génétique sont porteurs d'espoir quand ils fournissent des thérapies géniques ou des médicaments, mais l'ordre du vivant apparaît bouleversé dans l'imaginaire collectif lorsqu'ils concernent les cultures agricoles. Ces productions d'OGM sont suspectées *a priori*, avant qu'une évaluation scientifique fondée sur des indices biologiques probants établisse une éventuelle toxicité ou un impact environnemental.

Or cette suspicion *a priori* est redoutable, car elle touche une limite épistémologique dans l'établissement de la preuve. Étant donné cet *a priori*, prouver qu'une substance n'est pas toxique exigerait une régression à l'infini: il faudrait envisager chaque situation où la substance serait potentiellement toxique sur une durée indéterminée, ce qui est bien sûr impossible. Les OGM sont ainsi condamnés à rejouer ce jour sans fin où une preuve de non-toxicité p_n dépend d'une non-toxicité p_{n+1} – sauf à sortir de cette économie de la preuve et à soumettre les OGM à une évaluation au cas par cas, sur la base d'indices probants. Autrement dit, les OGM doivent être culturellement modifiés. ■

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

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

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

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

L'ESSENTIEL

• Les physiciens cherchent à produire des atomes aux noyaux plus lourds que ceux des éléments connus.

• Les noyaux superlourds produits à ce jour ont une durée de vie extrêmement courte.

• Mais en théorie, certains noyaux superlourds combinant

des bons nombres de protons et de neutrons pourraient être beaucoup plus stables.

• Ils représenteraient un « îlot de stabilité » dans le tableau périodique des éléments. Les chercheurs croient dans certains des éléments récemment produits les rivages de cet îlot.

LES AUTEURS



CHRISTOPH E. DÜLLMANN
chimiste nucléaire à l'université Johannes-Gutenberg de Mayence, en Allemagne



MICHAEL BLOCK
physicien nucléaire au GSI centre Helmholtz de recherche sur les ions lourds, Darmstadt, en Allemagne

La course aux éléments superlourds

Plusieurs équipes de physiciens se livrent une course effrénée pour produire les noyaux atomiques les plus lourds qui puissent exister. Leur objectif : être les premiers à planter leur drapeau sur le fameux « îlot de stabilité », région du tableau périodique qui grouperait des éléments superlourds et cependant non éphémères.



Si vous pouviez tenir un seul atome dans votre main, lequel serait le plus lourd? Réponse: l'oganesson. Son noyau dense renferme le nombre record de 118 protons. Par contraste, l'hydrogène, l'élément le plus léger et le plus répandu dans l'Univers (présent dans vos cellules, les océans de la Terre et l'atmosphère de Jupiter) n'en contient qu'un.

La découverte de l'oganesson a été annoncée en 2006. Les physiciens avaient utilisé un accélérateur de particules situé à Doubna, en Russie, pour bombarder une cible d'atomes lourds avec des millions de milliards d'ions calcium à chaque seconde. Au terme d'un total de 1 080 heures de collisions, les chercheurs avaient produit trois noyaux atomiques (un en 2002, deux autres en 2005) de cette nouvelle substance superlourde.

Ces nouveaux noyaux atomiques n'ont survécu qu'une poignée de millisecondes. Avec une durée de vie aussi brève, comment être certain de la réalité de la découverte? En fait, les physiciens de l'Institut unifié de recherches nucléaires (IURN) de Doubna ont procédé à un décompte minutieux du rayonnement et des noyaux plus petits émis lors des désintégrations. Cela leur a permis d'acquiescer à la quasi-certitude qu'ils avaient, l'espace d'un instant, créé le fameux élément. En 2015, après une décennie de vérifications en tous genres, l'élément 118 a officiellement rejoint le tableau périodique des éléments, c'est-à-dire la liste de référence des éléments qui constituent la matière. Il a été baptisé en l'honneur d'Iouri Oganessian, un pionnier de ces recherches à l'institut.

La découverte russe de l'oganesson est loin d'être le dernier épisode de cette histoire. Au cours de la dernière décennie, les chercheurs ont en effet repoussé plusieurs fois les marges du tableau périodique des éléments pour y inclure de nouveaux atomes toujours plus lourds. En même temps que l'oganesson était officialisé, les chercheurs ont également ajouté au tableau périodique des éléments contenant 113, 115 et 117 protons par atome (la nature chimique d'un élément est définie par le nombre de protons que contient le noyau de ses atomes). L'un de nous (Christoph Düllmann) a même pu réaliser des expériences de chimie sur plusieurs de ces éléments superlourds.

Cette exploration d'un monde inconnu est passionnante, mais les physiciens et les chimistes se heurtent à un problème de taille: les quelques atomes qu'ils forgent n'existent que quelques brefs instants avant de s'évanouir ou de se transformer. Et ce en raison de la répulsion entre protons: chargés positivement, ils se repoussent mutuellement et sont si

nombreux que les tensions internes finissent par l'emporter et déchirer la matière du noyau. Pour autant, les physiciens ne désespèrent pas, car il se pourrait que cette malédiction frappant les atomes superlourds soit levée pour certains d'entre eux et leurs isotopes (des versions du même élément où le noyau atomique recèle un nombre différent de neutrons).

Ces «survivants» du monde atomique, qui restent à découvrir, pourraient se maintenir pendant quelques minutes, voire quelques années, sans se désintégrer. Ensemble, ils constitueraient une région du tableau périodique qui fait depuis longtemps l'objet de spéculations: l'îlot de stabilité. Grâce à des configurations particulières du noyau qui leur confèreraient une stabilité inhabituelle, les éléments superlourds de cette région ne seraient plus de simples productions éphémères de laboratoire, mais pourraient résister au temps.

Avec les récentes découvertes d'atomes superlourds, les physiciens ont peut-être déjà entrevu les rivages de cet îlot. Prenez l'élément 114, par exemple. Dans un accélérateur, cet atome à 114 protons s'est désintégré un peu moins rapidement que ne le prédisaient les calculs. Quant à la demi-vie (c'est-à-dire le temps au bout duquel la moitié des atomes se sont désintégrés en un autre élément) d'autres éléments lourds récemment identifiés, on a constaté qu'elle s'allonge à mesure qu'augmente le nombre de neutrons dans le noyau.

UN ILOT OU LA DURÉE DE VIE EST RELATIVEMENT LONGUE

Même si cette durée de vie demeure encore brève, c'est un signe irréfutable que les physiciens s'approchent de la terre promise. De fait, ces observations concordent avec les prédictions: l'îlot de stabilité est censé se trouver dans la zone du tableau périodique où les atomes ont environ 114 protons et au moins autant de neutrons.

Maintenant que nous avons commencé à explorer cet îlot de stabilité, nous espérons en tracer les contours, déterminer son cœur (là où se concentrent les isotopes les plus stables) et découvrir combien de temps ces atomes peuvent subsister.

Il ne s'agit pas seulement d'ajouter quelques briques supplémentaires au grand lego de la nature. Car si nous étions un jour capables d'en fabriquer un kilogramme, ces éléments pourraient avoir des propriétés totalement inédites (et potentiellement utiles) qui les distingueraient de tous les matériaux connus. Et même si les substances que nous créons s'obstinent à se désintégrer beaucoup trop vite pour que nous puissions un jour les tenir entre nos mains, nous aurons avancé d'un pas vers une compréhension plus profonde de la chimie et de la nature fondamentale de la matière.

**LE TABLEAU
PÉRIODIQUE
DES ÉLÉMENTS**

Ce tableau essentiel de la chimie, appelé aussi tableau de Mendeleïev, présente tous les éléments connus en fonction du nombre de protons qui composent leurs noyaux atomiques. Les chercheurs tentent de le compléter avec des éléments plus lourds, c'est-à-dire dont le noyau atomique contient davantage de protons. Ils ont ainsi produit en laboratoire des noyaux « superlourds » (en rose). Ces noyaux sont trop instables pour exister à l'état naturel : ils se désintègrent très vite après s'être formés.

Numéro atomique
(nombre de protons
du noyau de l'atome)

Ce noyau atomique contient davantage de protons. Ils ont ainsi produit en laboratoire des noyaux « superlourds » (en rose). Ces noyaux sont trop instables pour exister à l'état naturel : ils se désintègrent très vite après s'être formés.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	* 57-71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	** 89-103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																														

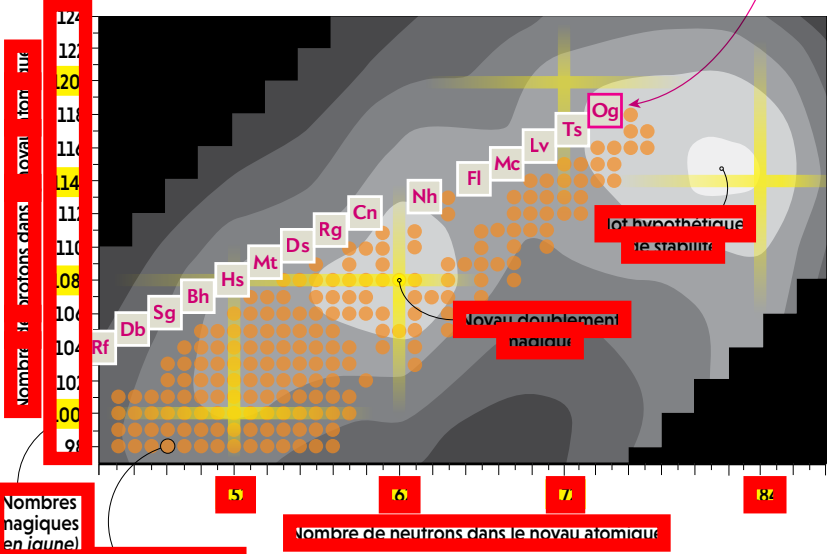
Positions
hypothétiques
des éléments
de numéros
atomiques 119
et 120,
non détectés
à ce jour

Les lanthanides (*) et les actinides (**) sont regroupés à part du corps principal du tableau en raison de leurs propriétés chimiques similaires.

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

L'ILOT DE STABILITE

Comme chaque proton d'un nouveau noyau est une charge positive qui repousse les autres protons, plus un noyau en contient, plus il risque de se désintégrer. Mais les physiciens pensent qu'un groupe de noyaux superlourds, qui restent à découvrir, pourraient être néanmoins stables grâce à une configuration particulière de leurs protons et neutrons. Selon un modèle théorique efficace, ces particules occupent des « couches » pouvant en contenir chacune un nombre maximal donné. Une couche est de stabilité maximale quand elle est complètement remplie, et c'est pourquoi les nombres de protons ou de neutrons pour lesquels les couches occupées sont remplies sont qualifiés de nombres magiques. Quand le nombre de protons et celui de neutrons sont tous deux magiques, on parle de noyau doublement magique. La théorie suggère par exemple qu'un noyau composé de 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique, mais les scientifiques n'ont pas encore obtenu de tels noyaux atomiques. On pense que s'ils y parvenaient, ces noyaux pourraient faire partie d'un « îlot de stabilité » regroupant des noyaux superlourds moins éphémères que les autres.



Les points orange
représentent des
noyaux produits
en laboratoire

es différents niveaux de gris indiquent la probabilité que la zone fasse partie de l'îlot de stabilité (probabilité plus faible pour les régions sombres, probabilité plus élevée pour les régions claires)

Le tableau périodique est une manière pour les chimistes de cartographier le monde atomique. Il a été conçu au XIX^e siècle par le chimiste russe Dmitri Mendeleïev (mais aussi, indépendamment, par le chimiste allemand Julius Lothar Meyer). Il liste les éléments dans l'ordre de leur numéro atomique (qui correspond au nombre de protons que contient le noyau atomique) et les place dans des colonnes en fonction de leur réactivité chimique, c'est-à-dire de la façon dont ils réagissent avec les autres atomes pour former des molécules.

A peine le tableau formulé, les chimistes ont commencé à se demander jusqu'où il s'étendait. L'élément le plus lourd trouvé dans la nature en quantités notables est l'uranium, dont le noyau contient 92 protons. Au-delà de ce nombre, chaque proton supplémentaire déstabilise le noyau: la répulsion électrostatique entre les protons (des charges positives) dépasse l'attraction due à l'interaction nucléaire – l'«interaction forte» – qui assure la cohésion du noyau atomique, et celui-ci se scinde: c'est la fission du noyau.

La stabilité d'un élément donné ne se résume toutefois pas au nombre de protons qu'il renferme; elle dépend aussi de l'organisation des protons et des neutrons dans le noyau atomique. Selon le modèle en couches du noyau développé à la fin des années 1940 par la Germano-américaine Maria Goeppert-Mayer et l'Allemand Hans Daniel Jensen (lauréats du prix Nobel en 1963), les deux types de particules remplissent ce qu'on appelle des couches nucléaires. Ces couches peuvent accueillir des nombres particuliers de protons et de neutrons, et sont analogues aux couches électroniques qui contiennent les électrons autour du noyau. Dans les deux cas, des couches complètement remplies garantissent une plus grande cohésion et assurent une meilleure stabilité.

PROTONS ET NEUTRONS: DES NOMBRES MAGIQUES...

Les physiciens ont conçu le modèle en couches quand ils se sont rendu compte que pour certains nombres «magiques» de protons ou de neutrons (2, 8, 20, 28, 50 et 82), les noyaux sont plus stables et plus difficiles à casser. Dans le modèle en couches, ces nombres magiques correspondent à des couches pleines. Les nombres magiques de protons et ceux de neutrons sont les mêmes, mais rien ne garantit qu'ils continueront à correspondre dans les futurs atomes que nous produirons. Un noyau dans lequel à la fois les couches de protons et celles de neutrons sont complètes est considéré comme «doublement magique».

Nous sommes encore loin d'avoir percé tous les mystères des nombres magiques. Quels seront les nombres magiques des

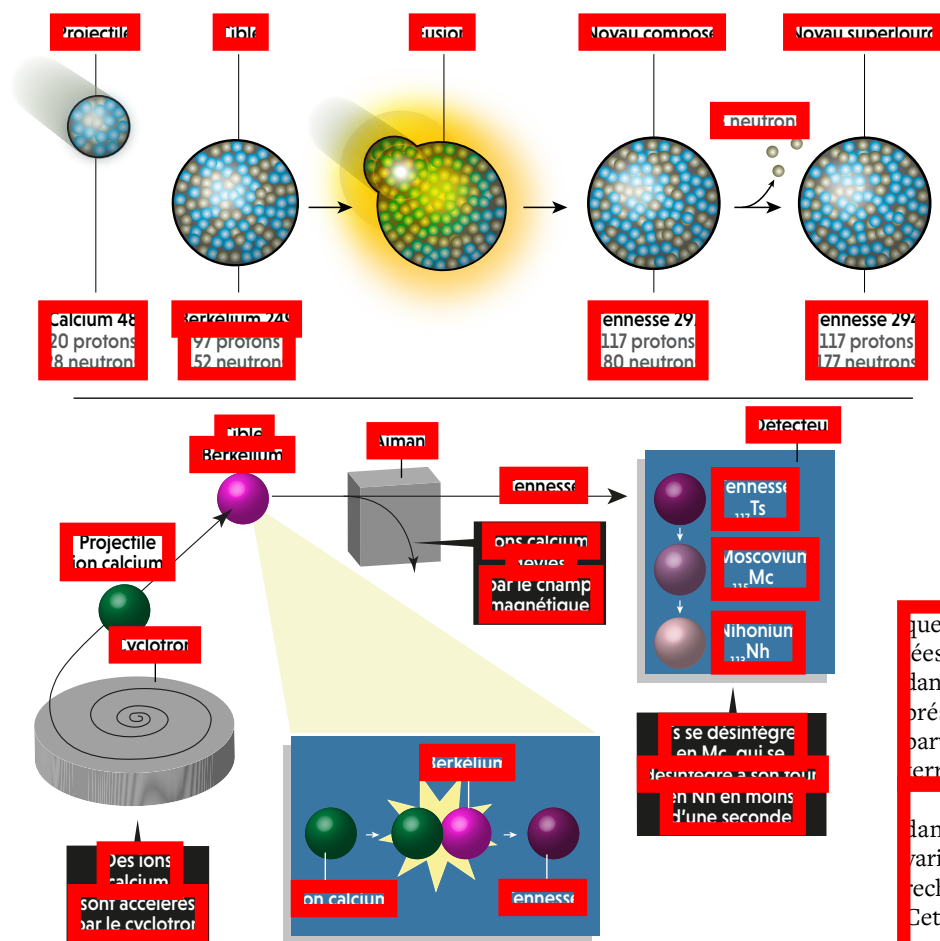
noyaux qui restent à découvrir?, s'interrogent par exemple les physiciens. Selon certaines prédictions théoriques, un noyau superlourd comportant 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique. Mais ce noyau demeure une vue de l'esprit: si nous avons produit l'élément 114 (nommé flerovium) en laboratoire, nous n'en avons pas encore obtenu une version à 184 neutrons. Or on prévoit qu'un tel isotope soit tellement stable que sa demi-vie approcherait l'âge de la Terre. Ce résultat théorique date des années 1960 et, à l'époque, suggérait pour la première fois l'existence d'un îlot de stabilité, notion qui a suscité une grande excitation dans la discipline et qui continue à nous motiver.

.. DONT LES PROCHAINS SONT MAL CONNUS

Mais la combinaison 114-184 est-elle vraiment magique? Nous l'ignorons. D'autres modélisations théoriques du noyau prédisent, par exemple, des configurations associant 120 ou 126 protons et 172 neutrons. Pour certaines des prédictions relatives aux futurs nombres magiques, nous avons une dette envers Albert Einstein. C'est lui qui a expliqué le fait étonnant que la masse d'un atome est inférieure à la somme des masses des protons, neutrons et électrons qui le constituent. Sa célèbre formule $E=mc^2$ indique que le défaut de masse résultant de cette inégalité reflète l'énergie de liaison, l'énergie nécessaire pour assurer la cohésion du noyau. Autrement dit, en pesant des atomes de compositions différentes en neutrons et protons, nous pouvons identifier les configurations qui se traduisent par une cohésion plus forte (c'est-à-dire celles qui correspondent aux nombres magiques) et déterminer dans quelle mesure elles sont plus stables.

Quelle que soit la valeur des prochains nombres magiques, nous pensons que nous

Selon certaines prédictions, le noyau formé de 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique



CRÉER DES ÉLÉMENTS SUPERLOURDS

Pour synthétiser un nouvel élément superlourd, les physiciens accélèrent un noyau « projectile » sur un noyau « cible » afin que les deux se combinent. Pour surmonter la répulsion électrique entre les deux noyaux chargés positivement, le projectile doit avoir une vitesse d'environ un dixième de celle de la lumière. Propulsé à une telle vitesse, le projectile vient effleurer le noyau de la cible et la force nucléaire attractive prend alors le dessus. Dans l'exemple présenté ci-contre, les chercheurs ont produit l'élément 117, le tennessee, en fusionnant du calcium et du berkélium. Une fois la fusion effectuée, le « noyau composé » a perdu trois neutrons pour devenir le noyau superlourd de tennessee avec 117 protons et 177 neutrons. Le principe des expériences de l'équipe russo-américaine qui a obtenu pour la première fois un noyau de tennessee, en 2010, est schématisé dans le dessin du bas.

que la collision de deux étoiles denses appelées étoiles à neutrons, avant d'être dispersés dans l'Univers. Dans ce cas, ils pourraient être présents dans les rayons cosmiques qui nous parviennent de l'espace, ou dans des roches terrestres.

De nombreux scientifiques se sont lancés dans l'aventure avec l'aide de techniques variées. Certains sont partis, par exemple, à la recherche de l'élément 110 (le darmstadtium). Cet élément devrait être relativement stable quand il a 184 neutrons (un nombre magique) et présenter des propriétés chimiques similaires à celle du platine, son voisin du dessus dans le tableau périodique. Grâce à des méthodes telles que la spectrométrie de fluorescence des rayons X et la spectrométrie de masse, les scientifiques ont recherché le darmstadtium dans les minerais naturels de platine. Hélas en vain: si ces roches renferment de tels atomes, c'est à un taux inférieur à une partie pour un milliard.

DES ÉLÉMENTS SUPERLOURDS DANS LES ROCHES OU LES RAYONS COSMIQUES?

Les physiciens ont également recherché les traces d'éléments superlourds dans les rayons cosmiques, par exemple au moyen de l'expérience UHCRE (Ultra-Heavy Cosmic-Ray Experiment ou Expérience pour les rayons cosmiques ultralourds) embarquée à bord du satellite LDEF (pour Long Duration Exposure Facility ou Équipement d'exposition de longue durée) de la Nasa, mais ils n'ont trouvé aucune preuve concluante de leur présence. Les efforts vont sans aucun doute se poursuivre, parce qu'une telle découverte aurait une grande importance sur le plan fondamental. De plus, l'identification de nouveaux éléments pourrait déboucher sur de nouveaux matériaux, dotés chacun de propriétés uniques.

Commençons à entrevoir l'îlot de stabilité. Les expériences les plus récentes ont démontré que la demi-vie des éléments superlourds qui sont produits maintenant en laboratoire augmente avec le nombre de neutrons, ce qui suggère que nous approchons du prochain nombre magique de neutrons.

Cette évolution est bien illustrée par le cas de l'élément 112, le copernicium (Cn): alors que la variante de l'élément à 112 protons et 165 neutrons (le ^{277}Cn) ne dure que 0,6 milliseconde environ, la déclinaison plus lourde de 3 neutrons (le ^{285}Cn) a, elle, une longévité environ 50000 fois supérieure! Cette tendance à l'avantage de stabilité se poursuivra vraisemblablement à mesure que l'on se rapprochera du centre de l'îlot de stabilité, mais jusqu'à quel point? On l'ignore. En particulier, la question se pose de savoir s'il existe des éléments superlourds qui soient complètement stables et donc de durée de vie infinie.

La seule possibilité que de tels éléments existent a poussé certains à les chercher dans la nature. Car le fait que nous n'en ayons pas encore observé ne signifie pas qu'il n'y en ait pas des traces cachées... juste sous notre nez. De tels atomes auraient pu se former avec d'autres éléments plus lourds que le fer lors d'événements astronomiques puissants, tels

potentiellement intéressantes pour les applications.

Comme nous n'avons pas encore trouvé d'éléments superlourds dans la nature, nous n'avons pas d'autre choix que de les forger en laboratoire. L'opération consiste à partir d'éléments « courants » et à les enrichir en protons. Comment ? En imitant les processus que l'Univers met en œuvre pour former les éléments lourds. Il suffit pour ce faire de bombarder un élément avec des neutrons. Puisque les noyaux contenant trop de neutrons ont tendance à transformer un de leurs neutrons excédentaires en un proton (par un processus de désintégration bêta), la méthode produit *in fine* un élément plus lourd, de numéro atomique supérieur d'une unité. Le problème de cette technique est qu'on ne peut former ainsi que des éléments allant jusqu'au fermium (l'élément 100). Au-delà de ce numéro atomique, le noyau ne subit pas de désintégration bêta et il est impossible d'ajouter des protons.

DES ACCELERATEURS POUR CRÉER DE NOUVEAUX ÉLÉMENTS

Pour aller plus loin et produire des éléments superlourds tels que l'oganesson, les scientifiques emploient une autre technique : ils amènent deux noyaux si près l'un de l'autre que l'interaction forte entre en jeu. Cette force a une portée extrêmement courte, ce qui signifie que les noyaux doivent pratiquement se toucher pour la ressentir. À une pareille distance, la force de répulsion entre les protons chargés positivement est énorme. C'est pourquoi les physiciens doivent fortement accélérer l'un des noyaux, à une vitesse d'environ 10% de celle de la lumière, et le projeter sur l'autre noyau. Cette vitesse est tout juste suffisante pour surmonter la répulsion due aux protons et permettre aux surfaces des noyaux d'entrer en contact.

Malgré ces conditions, la probabilité pour que les deux noyaux se touchent reste extrêmement faible. En outre, la probabilité de fusion des deux noyaux de départ en un noyau unique décroît à mesure que le nombre de protons du système augmente. Même quand un « noyau composé » unissant les deux noyaux originels se forme, le plus souvent il se scinde presque immédiatement en fragments plus légers. Ces deux tendances (la faible probabilité de formation d'un noyau composé, et la forte chance qu'il se scinde ensuite) jouent contre nous quand nous essayons de synthétiser des éléments superlourds.

En dépit des obstacles, les chercheurs ont enregistré de francs succès grâce à cette approche. Ils ont produit les éléments 113, 115, 117 et 118, dont les découvertes ont été entérinées en 2016 par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (l'UICPA a le pouvoir



de reconnaître officiellement et de nommer les nouveaux éléments).

L'élément 113 s'appelle maintenant le nihonium (symbole : Nh), en l'honneur du Japon où ont eu lieu les expériences ayant permis de le synthétiser (*Nihon* est, en japonais, l'un des deux noms du Japon). L'élément 115 est le moscovium (Mc), car c'est dans la région de Moscou, où se trouve l'JURN, que cet élément a été produit. Et l'élément 117 s'est vu attribuer le nom de tennesse (Ts), d'après l'État du Tennessee, où est implanté le Laboratoire américain d'Oak Ridge qui a fourni les noyaux cibles de berkélium (de numéro atomique 97) nécessaires à la synthèse de l'élément 117. L'oganesson (Og), avec ses 118 protons, ferme le bal des nouveaux intronisés.

EN LIGNE DE MIRE : L'ÉLÉMENT 119

Les projecteurs sont désormais braqués sur l'élément 119, qui ajouterait une nouvelle colonne au tableau périodique. Bien que plusieurs groupes, dont le nôtre, se soient mis en quête de cet atome superlourd, aucun n'a encore décroché la timbale, malgré le recours durant des mois aux accélérateurs les plus puissants au monde. L'un des problèmes rencontrés est que la technique qui fonctionnait bien jusqu'à l'oganesson (qui consistait à fracasser des ions de calcium sur des noyaux plus lourds) échoue au-delà parce que nous ne disposons pas en quantité suffisante de noyaux à plus de

TUBE D'ACCELERATEUR

Une vue de l'accélérateur linéaire du GSI, à Darmstadt. Ce dispositif de 120 mètres de long accélère des ions calcium, qui viennent frapper une cible contenant des éléments lourds, afin de produire des noyaux atomiques de nouveaux éléments superlourds.



98 protons à utiliser comme cibles. Nous essayons maintenant d'identifier quelles combinaisons d'éléments connus et disponibles offrent les meilleures chances de produire de nouveaux noyaux.

Même si les nouvelles espèces atomiques que nous produisons se désintègrent très vite, les percées notables ont été réalisées récemment dans les capacités d'observation et d'analyse des éléments superlourds. Aussi brève soit-elle, la durée de vie de ces atomes permet d'effectuer des expériences pour tester leurs propriétés physiques et chimiques, afin de savoir par exemple s'ils se comportent plutôt comme des métaux ou comme des gaz à température ambiante.

DES PROPRIÉTÉS DIFFICILES À PRÉVOIR

L'élément le plus lourd dont les propriétés chimiques ont été étudiées est le flérovium (l'élément 114, noté Fl), synthétisé pour la première fois en 1998. Il a d'abord laissé perplexes les physiciens. La place de cet atome dans le tableau périodique, juste au-dessous du plomb, implique qu'il devrait se comporter comme n'importe quel atome de métal lourd. Mais selon des théories remontant à 1975, il pourrait en fait prendre modèle sur les gaz dits rares, ces gaz inertes qui interagissent très peu avec d'autres matériaux. Où se situe la vérité ?

Ce comportement étrange calculé du flérovium est la conséquence du nombre de protons que son noyau contient et donc de la valeur de sa charge. En raison de la charge positive très élevée des noyaux d'éléments lourds, leurs électrons (de charge négative) vont à de très grandes vitesses pouvant atteindre 80% de celle de la lumière, et évoluent par conséquent sur des orbites différentes de celles qui caractérisent les éléments plus légers.

Chez le flérovium, par exemple, cet effet conduit à un grand écart d'énergie entre les deux orbites électroniques les plus externes. Ainsi, pour passer d'une orbite à l'autre, l'électron doit acquérir davantage d'énergie que si l'atome avait un noyau plus petit, tel le plomb situé juste au-dessus dans le tableau périodique. Dans le cas du plomb, la formation d'une liaison chimique fournira plus facilement l'énergie nécessaire aux électrons pour surmonter cet écart. En raison du grand écart entre ses niveaux d'énergie, il se peut que le flérovium ne se prête pas aussi facilement à des réactions chimiques que son homologue plus léger. Il pourrait alors ressembler davantage à des éléments réfractaires aux réactions chimiques (les gaz rares) qu'à des métaux typiques tels que le plomb.

Il est toutefois difficile de prédire comment se comportera exactement le flérovium. Les théories s'accordent généralement sur le fait

qu'il devrait être plus inerte que le plomb, mais il est probablement plus réactif que les véritables gaz rares et pourrait former, par exemple, des liaisons métalliques faibles avec des éléments tels que l'or. Comme personne n'a été en mesure de le produire en quantité, on ignore à quoi ressemblerait un morceau fait de cet élément. Selon certains, il prendrait une apparence blanc argenté ou gris pâle et serait solide à température ambiante.

Les intrigantes propriétés du flérovium ont poussé les physiciens à multiplier les expériences bien que leurs capacités de production se limitent à quelques atomes par jour. Pire, les demi-vies des isotopes les plus stables connus du flérovium ne dépassent pas une à deux secondes. L'un des meilleurs équipements dont dispose la communauté pour produire le flérovium est le *Tasca* (pour *TransActinide Separator and Chemistry Apparatus*, «appareil de tri et de chimie des transactinides», les transactinides désignant tous les éléments de numéro atomique supérieur à 103) situé au centre Helmholtz de recherche sur les ions lourds (GSI), en Allemagne, où nous travaillons tous deux.

PREMIÈRES EXPÉRIENCES DE CHIMIE

L'élément superlourd qu'est le flérovium est obtenu en bombardant du plutonium 244 avec un faisceau de calcium 48. Quand des noyaux de flérovium sont produits, des aimants les dirigent vers deux plaques de 32 centimètres de long se faisant face, couvertes chacune de détecteurs au silicium et espacées d'un demi-millimètre.

Les détecteurs sont recouverts d'une très mince couche d'or, ce qui nous permet d'étudier comment les atomes de flérovium interagissent avec ce métal. La première plaque est maintenue à température ambiante, tandis que la seconde est refroidie grâce à de l'azote liquide jusqu'à -160°C . Pourquoi ? Parce que les liaisons faibles (comme celles que les gaz rares établissent avec les matériaux) sont suffisamment fortes pour lier les atomes de flérovium à basse température, mais pas à température ambiante. Par conséquent, si le flérovium se comporte plutôt comme un métal, il ira se coller sur la plaque la plus chaude. En revanche, s'il ressemble plutôt à un gaz rare, il se liera à la surface froide ou ne réagira pas du tout.

Quand notre équipe a utilisé ce dispositif expérimental, nous avons observé deux atomes qui se sont tous deux désintégrés dans les détecteurs à température ambiante. Ce résultat laissait penser que le flérovium se liait plus comme un métal que comme un gaz rare. Mais nous avons été contredits par une autre expérience, menée par une équipe de l'institut Paul Scherrer, en Suisse, et réalisée au Laboratoire

Flerov des réactions nucléaires, en Russie. Sur les trois atomes que les expérimentateurs ont observés, l'un s'est désintégré sur la zone chaude et deux ont été trouvés dans la zone à basse température (maintenue environ à -90°C). Ils favorisent donc l'option gaz rare. Nous sommes nous-mêmes en train d'analyser de nouvelles données obtenues au GSI et espérons qu'elles clarifieront les propriétés de cet élément fascinant.

DES ÉTUDES DE SPECTROSCOPIE

Récemment, l'un de nous (Michael Block) a effectué avec son équipe les premières expériences de spectroscopie laser sur un élément superlourd, le nobélium (l'élément 102). Les chercheurs sont parvenus à produire des atomes de nobélium au rythme de quelques unités par seconde en bombardant une cible de plomb (82 protons) avec des ions de calcium (20 protons). Les atomes de nobélium étaient ensuite ralentis à l'intérieur d'un gaz d'argon et soumis à des impulsions laser. Pour certaines énergies des photons du laser, un électron de l'atome de nobélium absorbait un photon et s'échappait. En faisant varier la fréquence lumineuse, donc l'énergie des photons laser, Michael Block et ses collègues ont ainsi pu mesurer avec précision l'énergie nécessaire pour arracher un électron à l'atome de nobélium. Or cette «énergie d'ionisation» est l'une des propriétés caractéristiques qui assignent la place d'un élément dans le tableau périodique. Elle détermine la probabilité que l'élément réagisse avec d'autres éléments et forme des liaisons chimiques.

Ces analyses ont d'abord été réalisées sur l'isotope 254 du nobélium (^{254}No , qui a 152 neutrons), puis récemment étendues aux isotopes ^{252}No et ^{253}No afin de savoir comment un déficit en neutrons décale les énergies absorbées par les électrons. Les résultats renseigneront aussi sur la variation de la taille et de la forme des noyaux de ces isotopes, car ces caractéristiques du noyau (de charge positive) ont une influence sur le comportement des électrons (de charge négative).

D'autres chercheurs ont, quant à eux, réussi à créer des liaisons chimiques entre des éléments superlourds et des atomes plus modestes pour étudier comment les espèces exotiques interagissent. Un exemple récent de ce type de recherches est la synthèse de molécules contenant du seaborgium (l'élément 106, de symbole Sg). Dans des expériences réalisées au centre Nishina du Riken, au Japon, une équipe internationale dirigée par le groupe de Christoph Düllmann a produit un isotope de seaborgium dont la demi-vie est d'une dizaine de secondes. Du monoxyde de carbone (CO) a ensuite été ajouté dans l'enceinte contenant le seaborgium et cet élément lourd s'est alors

On est parvenu à créer des liaisons chimiques impliquant des atomes superlourds

transformé en un composé hexacarbonyle $\text{Sg}(\text{CO})_6$ où six molécules de monoxyde de carbone sont liées à l'atome central de seaborgium.

Christoph Düllmann et ses collègues ont montré que dans cette situation, le seaborgium se comporte en fait essentiellement comme ses homologues plus légers et plus courants que sont le tungstène et le molybdène, au même nombre d'électrons de valence.

LE SEABORGIUM, HOMOLOGUE DU MOLYBDÈNE ET DU TUNGSTÈNE

En effet, grâce à une expérience qui s'est déroulée en continu sur une quinzaine de jours, les chercheurs ont observé le seaborgium former le même type de composé avec des molécules de monoxyde de carbone que le molybdène et le tungstène, et au même taux. Les scientifiques vont maintenant tester lequel de ces trois éléments forme les liaisons les plus stables avec le monoxyde de carbone. D'après des calculs effectués à la fin des années 1990, il s'agirait du seaborgium, mais des simulations plus récentes et plus élaborées prévoient que les liaisons entre le monoxyde de carbone et le seaborgium seront plus faibles qu'avec le tungstène.

Ce ne sont là que quelques exemples du type d'expériences fascinantes que les chercheurs réalisent aujourd'hui sur les éléments superlourds, et des nombreuses questions ouvertes auxquelles ils espèrent apporter une réponse. Bien que les nouveaux membres du tableau périodique soient rares et exotiques, ces études expérimentales nous apportent des informations directes sur la façon dont ils s'insèrent dans le tableau décrivant les éléments plus classiques, que nous rencontrons dans la vie de tous les jours. Qu'ils soient instables ou d'une grande longévité (et que nous trouvions ou non un jour le cœur de l'îlot de stabilité), ces éléments superlourds ont beaucoup à nous apprendre sur les rouages des briques chimiques de la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Raeder et al., **Probing sizes and shapes of nobelium isotopes by laser spectroscopy**, *Physical Review Letters*, vol. 120, article 232503. 2018.

M. Laatiaoui et al., **Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium**, *Nature*, vol. 538, pp. 495-498. 2016.

C. E. Düllmann et al., **Special Issue on Superheavy Elements**, *Nuclear Physics A*, vol. 944, pp. 1-690. 2015.

S. Oganessian et al., **À la recherche de l'îlot superlourd**, *Pour la Science*, n° 269, pp. 60-65, mars 2000.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE3 FORMULES
À CHOIR

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€ 29 % de réduction	79€ Au lieu de 114,40€ 31 % de réduction	99€ Au lieu de 174,00€ 43 % de réduction

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90055 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

FORMULE
DÉCOUVERTE
12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

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

79€

Au lieu de 114,40€

FORMULE
INTÉGRALE
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,00€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

N° : Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) :

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

Signature obligatoire :

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

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

PRÉSENTATION

La découverte des éléments de numéros atomiques 113, 115, 117 et 118 a été annoncée le 30 décembre 2015 par l'Union internationale de chimie pure et appliquée.

Cette annonce s'appuyait sur les conclusions d'un groupe d'experts. Une controverse est née, certains chercheurs mettant en doute la qualité

de l'évaluation réalisée par ce groupe et critiquant le fait que l'Union internationale de chimie pure et appliquée n'ait pas été informée de ses conclusions avant l'annonce.

Pour éviter de futurs conflits, les deux sociétés savantes ont convenu de nouvelles procédures pour officialiser la découverte d'un nouvel élément.

AUTEUR



EDWIN CARTLEDGE, journaliste scientifique basé à Rome, en Italie.

Article initialement publié en ligne par *Nature* le 13 juin 2018 sous le titre « Trouble in the periodic table » (doi: 10.1038/441586-018-05371-y). Traduction et édition réalisées par *Pour la Science*.

Du rifi sur le tableau périodique

L'officialisation et l'annonce en fanfare de la synthèse des éléments superlourds ayant pour numéros atomiques 113, 115, 117 et 118 ont aussitôt déclenché une controverse : la proclamation de ces découvertes n'était-elle pas prématurée ?

L'ambiance au château de Bäckaskog, dans le sud de la Suède, aurait dû être à l'optimisme lorsque chimistes et physiciens s'y sont réunis pour un symposium en mai 2016. La conférence, parrainée par la fondation Nobel, devait permettre aux chercheurs de faire le point sur les efforts déployés dans le monde pour explorer les limites de la physique nucléaire, et de célébrer les quatre nouveaux éléments ajoutés au tableau périodique quelques mois plus tôt. Les noms de ces éléments devaient être annoncés sous quelques jours, un grand honneur pour les chercheurs et les pays impliqués dans leur découverte.

Bien que de nombreux participants aient été avisés de la façon dont leur domaine se développait – et des gros titres auxquels il donnait lieu dans les journaux – beaucoup d'entre eux étaient préoccupés. Ils redoutaient qu'il y ait eu des failles dans l'évaluation des travaux sur ces nouveaux éléments et craignaient que l'examen critique de ces découvertes ait été insuffisant.

Certains estimaient qu'il n'y avait pas suffisamment de preuves pour justifier l'ajout des éléments les plus controversés, ceux de numéros atomiques 115 et 117. L'intégrité scientifique du tableau périodique des éléments était en jeu.

Vers la fin de la réunion, un scientifique demanda un vote à main levée pour savoir s'il fallait ou non annoncer les noms des éléments comme prévu. La question révéla la profonde inquiétude au sein de l'assemblée. La plupart des chercheurs votèrent pour repousser l'annonce, indique Walter Loveland, chimiste nucléaire à l'université d'État de l'Oregon à Corvallis. Et cela déclencha une réaction incroyable de certains des scientifiques russes dont les efforts avaient conduit à la découverte de trois des nouveaux éléments. « Ils ont tapé du pied et sont sortis », raconte Walter Loveland. « Je n'ai jamais vu ça dans un congrès scientifique. »

Malgré ces troubles, les noms des éléments ont été annoncés peu de temps après. Le nihonium (de numéro atomique 113), le moscovium (115), le tennessé (117) et l'oganesson (118) ont rejoint les 114 éléments



précédemment découverts (dont ceux de numéros atomiques 114 et 116) en tant qu'ajouts permanents au tableau périodique. Près de cent cinquante ans après que Dmitri Mendeleïev a rêvé d'une telle classification, la septième ligne du tableau des éléments était officiellement complétée.

Pourtant, la façon dont les événements se sont déroulés a profondément contrarié certains chercheurs. Claes Fahlander, physicien nucléaire à l'université de Lund, en Suède, s'attend à ce que les résultats expérimentaux viennent finalement confirmer les annonces du moscovium et du tennessé. Néanmoins, il soutient qu'il était « prématuré » d'approuver l'ajout de ces éléments. « Nous sommes des scientifiques », explique-t-il, « nous ne vivons pas dans les croyances, nous voulons des preuves ».

Alors que le monde se préparait à célébrer l'année internationale du tableau périodique en 2019, le débat sur les quatre ajouts récents a conduit à la révision du processus de vérification de futurs nouveaux éléments. Et la controverse a jeté le doute sur la rangée du bas du tableau périodique: il est possible que les autorités scientifiques responsables de la table réévaluent certaines des dernières découvertes.

Une partie du problème découle d'un désaccord entre certains chimistes et physiciens sur la question de savoir qui devrait être le garant légitime du tableau périodique. Historiquement, les chimistes ont joué ce rôle, car ce sont eux qui ont découvert au cours des siècles les éléments naturels grâce à des techniques propres à la chimie.

Depuis plusieurs décennies, cependant, les physiciens nucléaires mènent la traque de

nouveaux éléments, qu'ils créent artificiellement en fracassant des noyaux atomiques sur les cibles. Il faut parfois des années pour produire un seul atome de ces éléments superlourds, qui sont en outre notoirement instables et se désintègrent par radioactivité en quelques fractions de seconde. Ainsi, alors que les équipes rivalisaient pour être les premières à obtenir les prochains éléments, il est devenu plus difficile d'établir la preuve de leurs découvertes.

UNE DECISION QUI DEPEND DU JWP. UN GROUPE D'EXPERTS

La responsabilité de l'approbation ou du rejet de nouveaux éléments incombe à deux organisations sœurs: l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) et l'Union internationale de physique pure et appliquée (IUPAP). Depuis 1999, elles s'appuient sur le jugement d'un groupe d'experts connu sous le nom de Joint Working Party (JWP), présidé par Paul Karol, chimiste nucléaire à l'université Carnegie-Mellon, à Pittsburgh, en Pennsylvanie. Réactivée périodiquement pour évaluer au fil de l'eau la découverte de nouveaux éléments, la dernière équipe du JWP s'est constituée en 2012 et s'est dissoute en 2016. Elle se composait de Paul Karol et de quatre physiciens.

Durant cette période, le groupe a attribué le mérite de la découverte des éléments 115, 117 et 118 à une collaboration russo-américaine dirigée par le physicien nucléaire chevronné Yuri Oganessian, de l'Institut unifié de recherches nucléaires (JINR pour Joint Institute for Nuclear Research), à Doubna, en Russie. Et le groupe d'experts a attribué l'élément 113 aux chercheurs du centre Nishina de recherches par accélérateur de l'institut Riken, près de Tokyo.

En 2015, quatre éléments superlourds sont venus officiellement compléter les cases du tableau périodique des éléments. Ils ont été nommés en 2016. Leurs noyaux atomiques, qui comprennent 113, 115, 117 et 118 protons, ont été produits en laboratoire, mais leur mise en évidence est difficile, notamment en raison de leur brève durée de vie.



Les décisions du JWP ont été annoncées publiquement le 30 décembre 2015, lorsque l'UICPA a publié un communiqué de presse clarifiant la découverte des quatre nouveaux éléments (qui n'avaient pas encore reçu leur nom officiel). Les représentants de l'UICPA ont déclaré qu'ils avaient travaillé rapidement pour communiquer cette décision. En fait, ils ont émis cette annonce avant que le comité exécutif de l'UICPA ne puisse approuver les conclusions de JWP, comme le précisent pourtant ses règles internes. Cette approbation a eu lieu le mois suivant. Plus gênant, les conclusions du JWP n'avaient même pas été présentées à l'Union internationale de physique, l'UIPPA, qui s'attendait à être consultée, affirme Bruce McKellar, de l'université de Melbourne, en Australie, qui présidait cette association à l'époque.

TENSIONS ENTRE DEUX SOCIÉTÉS SAVANTES

Cette omission a ravivé les tensions entre les deux sociétés savantes. Cecilia Jarlskog, physicienne à l'université de Lund et présidente de l'UIPPA avant Bruce McKellar, affirme que pendant des années, l'Union internationale de chimie avait, de façon injustifiée, la mainmise sur le processus d'évaluation des découvertes (Paul Karol a déclaré à la revue *Nature* qu'en préparant les rapports du JWP, il était en relation presque exclusivement avec la société de chimie). Exprimant sa frustration lors du symposium de 2016, en Suède, Cecilia Jarlskog a accusé l'UICPA d'essayer de se mettre en avant en annonçant elle-même la découverte, et a fait valoir que seuls les physiciens «ont la compétence» pour évaluer les annonces de nouveaux éléments.

Les tensions entre les communautés des physiciens et des chimistes ont été exacerbées par des critiques sur la façon dont le JWP avait évalué la découverte des éléments 115 et 117. Le JWP avait validé les conclusions de l'équipe ayant découvert ces éléments, qui trouvait que les chaînes de désintégration radioactive des deux éléments présumés correspondaient bien et renforçaient la crédibilité des deux découvertes. Mais une telle analyse est notoirement sujette à caution pour les éléments de numéro atomique impair. Claes Fahlander et ses collègues, à l'université de Lund, ont signalé qu'il est très peu probable qu'une telle correspondance existe entre les éléments 115 et 117 – point qui a été porté à l'attention du JWP en février 2015.

Robert Barber, membre du groupe d'experts et physicien nucléaire à l'université du Manitoba, au Canada, explique que même si ses collègues et lui étaient «très préoccupés» par l'utilisation de ce type d'analyse, ils avaient conclu qu'il n'y avait pas d'alternative et qu'ils

étaient parvenus à un consensus sur toutes leurs décisions. Walter Loveland soutient également la décision globale. Et même si le dernier groupe du JWP s'est trompé sur certains détails, dit-il, le passé montre qu'il est peu probable que ses décisions soient remises en cause.

Le physicien nucléaire Vladimir Utyonkov, de l'institut de recherche nucléaire de Doubna, incrimine pour sa part directement le JWP. Bien qu'il ne soit pas d'accord avec l'argument du groupe de Lund sur l'analyse croisée et qu'il soit convaincu que la découverte russo-américaine est solide, il soutient que le groupe ne comprenait aucun expert «de haut niveau» sur la synthèse d'éléments lourds, et affirme que ses rapports préliminaires contenaient de nombreuses erreurs.

Paul Karol défend le travail que ses collègues et lui ont réalisé dans le cadre du JWP en déclarant qu'ils avaient essayé de se conformer aux critères publiés régissant le processus d'évaluation. Dans l'ensemble, dit-il, «je crois que le comité était extrêmement à l'aise avec le contenu de son rapport.» Il semble pourtant que la plupart des participants au congrès de 2016 en Suède aient été critiques vis-à-vis du JWP. David Hinde, physicien nucléaire à l'université australienne de Canberra, a demandé aux quelque cinquante chercheurs présents s'ils pensaient que les conclusions du panel d'experts étaient «scientifiquement satisfaisantes». Il dit avoir reçu très peu de réponses positives à cette question.

UNE QUESTION D'ÉVALUATION

Malgré ces divers problèmes, l'UICPA et l'UIPPA sont allées de l'avant et ont annoncé en juin 2016 les noms des quatre nouveaux éléments. Bruce McKellar admet qu'il avait des doutes à ce sujet, mais indique que, selon la plupart des physiciens et des chimistes qu'il a consultés, les conclusions générales du JWP – si ce n'est tous les détails de leurs analyses – étaient probablement solides.

Jan Reedijk, alors président de la division de chimie inorganique de l'UICPA, affirme que l'annonce initiale a été faite très tôt pour éviter des fuites dans la presse et pour satisfaire les demandes des laboratoires à l'origine de la découverte, impatients de diffuser l'information. Pour ce faire, raconte-t-il, il a rapidement approuvé les conclusions de JWP en décembre 2015 au nom de sa division, après qu'elles ont été expertisées par des pairs et acceptées pour publication dans la revue *Pure and Applied Chemistry* de l'Union internationale de chimie. «J'ai constaté que l'examen adéquat avait été fait, alors j'ai donné mon feu vert en moins d'une heure», ajoute-t-il.

Toutefois, il n'est pas clair s'il y a eu une évaluation vraiment indépendante ou non. Selon la directrice exécutive de l'Union

PREMIÈRES MESURES DIRECTES DES MASSES

Bien que certains chercheurs aient émis des doutes sur les détections des derniers noyaux superlourds, les recherches effectuées depuis les annonces tendent à confirmer ces découvertes. Le développement le plus récent en ce sens a été la mesure directe par séparation spatiale des noyaux en fonction de leur rapport masse/charge), du nombre de masse (somme des nombres de protons et de neutrons) de noyaux de moscovium et de nihonium (J. M. Gates et al., *Physical Review Letters*, vol. 121, 22501, 2018). La mesure a porté sur des noyaux produits au laboratoire américain Lawrence-Berkeley en irradiant de l'américium 243 avec des ions de calcium 48. Les nombres de masse trouvés, 288 et 284 respectivement, sont compatibles avec les mesures indirectes fondées sur l'analyse des chaînes de désintégration, entachées de plusieurs incertitudes.

internationale de chimie, Lynn Soby, le travail du JWP a été examiné en deux étapes avant l'annonce. Tout d'abord, ses conclusions ont été transmises à plusieurs laboratoires, principalement ceux qui ont participé aux dernières découvertes, ainsi qu'à un autre expert proposé par l'un des laboratoires. Ensuite, les rapports du JWP ont été envoyés aux membres du comité de l'UICPA consacré à la nomenclature, aux symboles et à la terminologie des éléments de la table périodique.

Selon Lynn Soby, le travail du comité consistait à vérifier les erreurs de formulation et de présentation, et qu'il incombait donc aux laboratoires eux-mêmes d'effectuer un examen scientifique. Elle affirme que cette procédure était appropriée, puisqu'ils sont les experts du domaine. Pourtant, l'un de ces chercheurs, Vladimir Utyonkov, pensait que l'UICPA avait recruté quinze experts indépendants pour effectuer l'évaluation scientifique. Il a supposé qu'on lui demandait simplement, ainsi qu'à deux collègues de Doubna, de vérifier les faits et les chiffres dans les rapports. «Je ne sais pas comment nous pouvons être considérés comme des rapporteurs indépendants», dit-il.

Rétrospectivement, Cecilia Jarlskog aurait souhaité que la communauté des physiciens.

dont elle-même, prête une plus grande attention à la façon dont le processus d'évaluation a été conduit, en particulier à l'arbitrage des conclusions du JWP. «Notre négligence va me faire faire des cauchemars.»

DES REGLES MODIFIEES

Pour répondre aux différents points soulevés, les deux unions internationales ont convenu de nouvelles procédures d'évaluation pour tout futur élément. Selon les règles modifiées, qui ont été publiées en mai 2018, les présidents de l'UICPA et de l'UIPPA auront maintenant la possibilité d'examiner les résultats du JWP avant d'annoncer conjointement leurs conclusions. Pour ce faire, ils mèneront un processus indépendant d'évaluation par les pairs en plus de celui de la revue *Pure and Applied Chemistry*.

Bruce McKellar affirme que les changements auront un effet positif. «Les deux unions internationales ont développé une relation de confiance en travaillant ensemble sur cette question», dit-il. Mais ces changements ne satisferont pas certains scientifiques critiques, comme Cecilia Jarlskog. «Je ne pense pas que les nouvelles règles changeront quoi que ce soit», conclut-elle. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Corish, **Procedures for the naming of a new element**, *Chemistry International*, vol. 38, pp. 9-11 2016

C. Jarlskog, **Validation of new superheavy elements and IUPAC-IUPAP joint working group**, *EPJ Web Conf.* vol. 131, 06004 2016

P. J. Karol et al., **Discovery of the elements with atomic numbers $Z = 113$, 115 and 117 (IUPAC Technical Report)**, *Pure and Applied Chemistry*, vol. 88, pp. 139-153 2016

J. Forsberg et al., **A new assessment of the alleged link between element 115 and element 117 decay chains**, *Physics Letters B*, vol. 760, pp. 293-296 2016



TED^x Saclay
x = independently organized TED event

18 nov. 2019

Présorances

Innovons ensemble au service du vivant










<https://tedxsaclay.com/videos>

Abonnez-vous à notre newsletter et participez activement au prochain TEDx !

tedxsaclay.com

LES ÉVÉNEMENTS

Il y a quelque 14 700 ans, les températures maximales annuelles sont passées de 9 à 19 °C : les glaciers ont alors régressé, tandis que les forêts ont peu à peu remplacé la toundra.

Le mode de vie des Magdaléniens, pratiqué alors partout en Europe, fut progressivement remplacé

par celui des Aziliens. De nouvelles armes de chasse et de nouveaux modes d'exploitation du territoire sont apparus.

L'analyse des vestiges de cette transition montre que l'adaptation des sociétés aux nouvelles conditions environnementales a souvent suivi l'évolution du climat avec environ un siècle de retard.

LES AUTEURES



SONJA GRIMM
préhistorienne au Centre pour l'archéologie balte et slave à Schleswig, en Allemagne



DANIELA HOLST
préhistorienne à l'Institut de préhistoire et d'histoire ancienne de l'université de Cologne

Et le réchauffement acheva le Magdalénien



Lorsque des forêts ont remplacé la toundra parcourue d'immenses troupes de rennes, de chevaux ou de bisons, les chasseurs-cueilleurs d'Europe se sont adaptés. Une vaste étude révèle que leurs réactions ont toujours suivi les évolutions climatiques, mais avec un certain retard.

Il y a entre 16000 et 13000 ans, la dernière ère glaciaire arrivait lentement à son terme. Nommée Weichsélien, elle avait commencé quelque 100000 ans plus tôt. On pourrait croire que ce réchauffement a facilité la vie des populations européennes. Toutefois, plusieurs oscillations climatiques, parfois brutales, ont remanié temporairement les conditions glaciaires sur l'Europe. Cette difficile transition vers la période chaude actuelle a mis les populations européennes à l'épreuve. Afin d'étudier comment, et avec quelle inertie, ces populations ont adapté leur économie et leur mode de vie, nous avons compilé toutes les données disponibles pour cette période. Cela nous a donné l'occasion d'éprouver le vieux précepte archéologique suivant lequel les sociétés du passé évoluaient surtout en réaction au climat. Pas si simple, comme nous allons le voir!

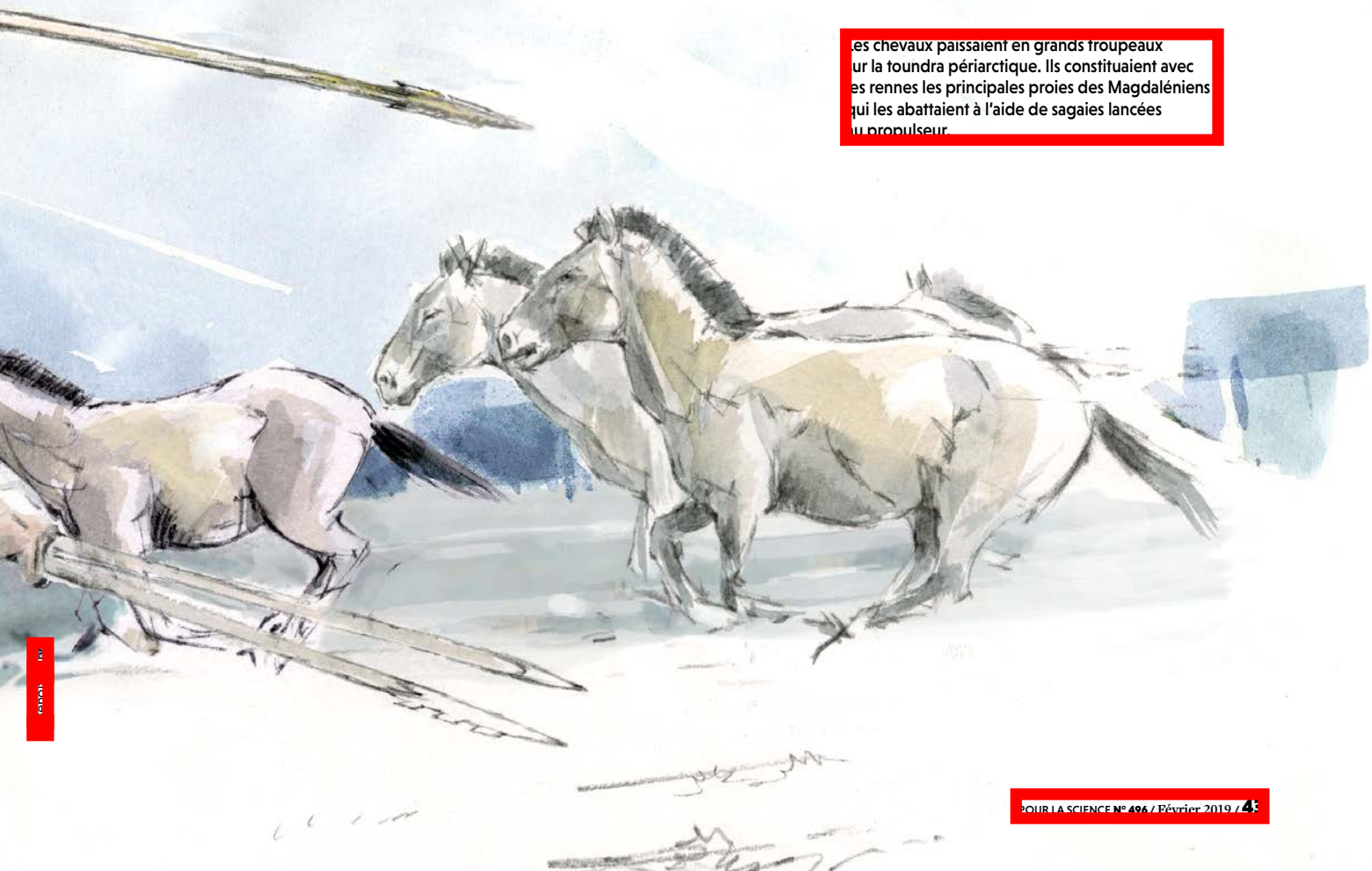
La dernière glaciation s'est terminée il y a quelque 14700 ans pendant le Magdalénien, une période culturelle qui apparaît dans le registre archéologique vers 17000 et se termine

vers 12000 BP (*before present*, soit par convention avant 1950). La dernière glaciation? En termes géologiques, il s'agit plus précisément de la dernière période froide, puisque nous vivons actuellement dans l'une des périodes chaudes de la fin du Cénozoïque (66 millions d'années à aujourd'hui), une ère géologique caractérisée par l'enchaînement d'au moins dix-sept épisodes glaciaires successifs.

Il y a 17000 ans, les Magdaléniens occupaient surtout l'Europe méridionale. Quand la période froide du maximum glaciaire s'est terminée vers 14700 BP, ils ont colonisé progressivement le reste de l'Europe, notamment ses zones les plus septentrionales. Ces spécialistes de la vie dans la toundra périglaciaire ont alors vu leur milieu ouvert se transformer en forêt. À la suite de cela, en 1500 ans, leur mode de vie a évolué vers celui des Aziliens que, en Allemagne et parfois dans le nord de la France, on nomme aussi groupes à Federmesser (littéralement à «couteaux-plumes», nommés en France «pointes à dos courbe», voir la figure page 44).

Comprendre comment s'est déroulée la transition entre le Magdalénien et l'Azilien

Les chevaux paissaient en grands troupeaux sur la toundra périarctique. Ils constituaient avec les rennes les principales proies des Magdaléniens qui les abattaient à l'aide de sagaies lancées au propulseur.



implique de se pencher d'abord sur le climat. L'évolution générale des températures et des précipitations dans le monde entier se déduit des carottes extraites de la glace du Groenland, formée par le compactage des couches annuelles de neige. La composition isotopique de cette glace – surtout celle de l'oxygène et du soufre atmosphériques qu'elle contient – fournit des informations précieuses sur les évolutions climatiques du passé à l'échelle planétaire. Le forage groenlandais ayant dépassé la profondeur de 3000 mètres, pas moins de 123000 ans de l'histoire climatique ont été enregistrés.

Ainsi, en Europe à la fin de la glaciation, les calottes glaciaires ne couvraient plus que le sud de la Scandinavie, le nord de la Grande-Bretagne et les Alpes. Dans les zones libres de glace, il ne restait presque plus de pergélisol, mais la terre gelait profondément en hiver. Les très épais dépôts de loess (un fin sédiment éolien limoneux) de cette période suggèrent que les tempêtes de poussière n'étaient pas rares. Le paysage consistait en steppes arides et froides couvertes d'une pauvre végétation peu exigeante. Les arbres et les arbustes ne poussaient qu'en quelques endroits abrités et assez humides.

A l'échelle régionale, voire locale, on compile ces données continentales en exploitant les informations climatiques livrées par les plantes fossiles ou les sédiments lacustres. Selon ces sources sédimentaires, en Rhénanie et dans le nord de la France, la température maximale annuelle entre 16000 et 14700 BP était d'environ 9 °C.

UNE NOURRITURE ABONDANTE

Pour les chasseurs-cueilleurs, ces conditions n'étaient en fait nullement hostiles, car le paysage ouvert, accueillant d'énormes troupeaux de rennes et de chevaux ainsi que des groupes de bisons et d'antilopes saïga, offrait autant de proies qu'ils en voulaient. Le fait que les artistes magdaléniens aient si bien su dessiner des mammouths suggère qu'ils avaient vu ces pachydermes, et donc qu'ils étaient encore présents en Europe occidentale. Ils ne jouaient plus cependant de grand rôle dans l'alimentation des chasseurs.

Quand, il y a environ 14700 ans, les températures ont commencé à grimper, les glaciers se sont mis à fondre et les précipitations ont augmenté. En à peine 150 ans, les températures annuelles maximales de la Rhénanie et du nord de la France ont atteint 19 °C. Les prairies steppe- biques ont alors cédé la place à des forêts de bouleaux, qui se sont ensuite densifiées et étendues. Les troupeaux d'herbivores de la toundra ont suivi la steppe reculant vers le nord jusqu'à disparaître complètement d'Europe centrale. Les chevaux, pour leur part, étaient mieux à

nême de faire face aux nouvelles conditions, mais leurs troupeaux se sont amenuisés. Dans le même temps, les animaux forestiers habitués aux climats plus chauds, tels le sanglier, l'auroch, le cerf rouge et l'élan sont apparus.

Les données nous apprennent cependant qu'à trois reprises, vers 14000, 13650 et 13150 BP, cette évolution climatique globale a été interrompue par le retour des conditions glaciaires pour un ou deux siècles; plus tard, au Dryas récent (12800 à 11500 BP), le froid est encore revenu, cette fois pour pas moins de 1300 ans. La température maximale annuelle est alors retombée à seulement 9 °C, tandis que les glaciers et les surfaces de sols gelés recommençaient à croître, ce qui, dans certaines régions, s'accompagnait du retour de la toundra. Pour sa part, la forêt a résisté dans les zones protégées jusqu'à ce que, vers 11690 BP, l'Europe entre dans une nouvelle ère géologique – l'Holocène – et la période chaude actuelle.

Afin d'étudier l'adaptation des populations humaines à ces changements extrêmes, nous avons repris les données prélevées dans 26 sites déjà fouillés de Rhénanie, du nord de la France et du sud de la Belgique. Après avoir classé ces données, l'une d'entre nous (Sonja Grimm) a analysé comment les chasseurs-cueilleurs colonisaient les territoires, s'alimentaient, disposaient de leurs ressources et quels systèmes techniques ils mettaient en œuvre. Plus de 90 évolutions notables ont ainsi été mises en évidence, ce qui nous a permis de retracer minutieusement l'évolution des différents pans du mode de vie des

LES POINTES AZILIENNES

Les pointes à dos courbe – ou *Federmesser* en allemand – ont été mises au jour lors de fouilles en Rhénanie-Palatinat. Elles prouvent qu'il y a quelque 13000 ans, la culture azilienne (ou *Federmesser*) se développait dans la vallée du Rhin.

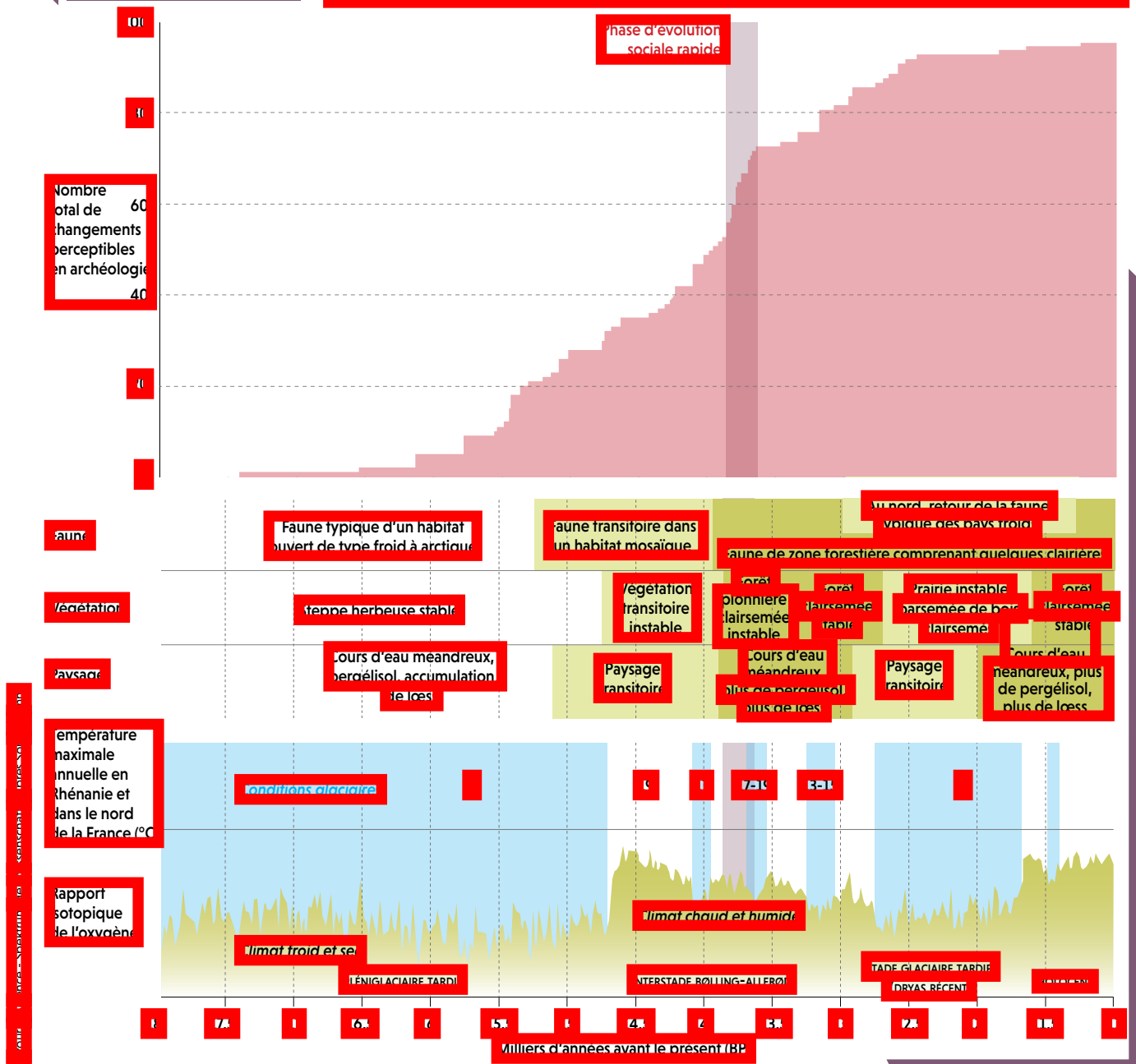


INNOVATION ET CLIMAT

chasseurs-cueilleurs. Pour la première fois, l'influence du climat, que l'on suppose toujours primordiale en archéologie, a pu être mise à l'épreuve des faits! Nous avons résumé l'ensemble des changements intervenus dans un graphique reflétant la dynamique du changement de comportement des chasseurs-cueilleurs pendant la transition Magdalénien-Azilien (voir l'encadré ci-dessous).

Que met en évidence cette étude? Il y a quelque 15 500 ans, la culture magdalénienne dominait l'Europe. Les ancêtres des Magdaléniens ont été les pionniers de l'adaptation aux steppes glacées qui couvrirent notre continent après le retrait des glaces formées pendant la période du maximum glaciaire entre 26 000 et 20 000 ans BP. Le mode de vie de ces chasseurs de rennes était très rigide: il semble

La compilation et l'analyse des découvertes faites sur 26 sites allemands, français et belges ont révélé plus de 90 évolutions différentes des données archéologiques à la fin de la période glaciaire. Leur mise en regard avec les évolutions climatiques concomitantes révèle comment les sociétés de la fin du Paléolithique ont réagi au changement. Le plus grand dynamisme social s'observe dans la période marquée par une bande violette: pendant le siècle de transition, le nombre des innovations s'est accru nettement plus vite qu'auparavant ou après. On observe en revanche que lors de chaque retour du froid, il se remet à stagner.



qu'ils appliquaient en toutes circonstances et dans tous les domaines de leur vie des règles intangibles. C'est, entre autres, ce que suggère l'uniformité frappante de leur armement dans toute l'Europe. Celui-ci consistait pour l'essentiel en pointes de sagaies en os, en ivoire ou en bois de cervidé, où des lamelles tranchantes de silex avaient été insérées (afin d'ajouter un pouvoir dilacérant à l'arme). Les chasseurs lançaient ces projectiles à l'aide de propulseurs en bois de cervidés ou en bois, très comparables à ceux qu'emploient les Aborigènes australiens. Un tel propulseur allonge le bras, donc le bras de levier, et par là accroît la vitesse de la sagaie et sa capacité à pénétrer le corps d'un animal pour mieux le faire saigner.

Ainsi propulsées, ces sagaies faisaient des Magdaléniens des maîtres de la chasse au cheval et au renne (voir la figure page 42). Les chasseurs savaient exactement où et quand passaient les grands troupeaux et comment y prélever des proies. Vitaux pour leur survie, ces savoir-faire exigeaient une transmission des connaissances sur la chasse et l'instruction correcte des tireurs. Les chasseurs qui ne savaient pas embusquer au bon endroit au bon moment n'obtenaient pas de grandes proies.

Le menu magdalénien comprenait aussi des poissons, du gibier à plume et, dans une moindre mesure, des produits de la cueillette de végétaux. Les vestiges des boucheries magdaléniennes prouvent par ailleurs qu'en plus des grands mammifères, ils ne négligeaient pas le petit gibier, tels les lièvres ou les renards (sans doute aussi intéressants pour leur peau). Sous un climat aussi rude que le leur, il aurait en effet été insensé de se passer de ces petites proies : après tout, l'arrivée des grands troupeaux pouvait être retardée et la faim survenir très vite. Les Magdaléniens géraient donc leurs ressources de façon rigoureuse et durable. Dans leur prudente pratique, rien n'était gaspillé : la présence, dans les ateliers de boucheries magdaléniennes, de milliers de minuscules esquilles d'os montre par exemple que tous les os étaient cassés, puis mis à bouillir dans des marmites creusées dans la terre, étanchéifiées par des peaux et chauffées par des pierres brûlantes retirées du feu.

L'analyse détaillée des modes de colonisation des Magdaléniens et de leur mobilité conduit à cette même impression d'un système de vie strict, immuable et prudent : au Weichsélien final, on séjournait pendant une grande partie de l'année au sein de campements étendus en essayant de s'approvisionner dans les environs. La comparaison avec les peuples arctiques d'aujourd'hui suggère que les clans comprenaient de 25 à 30 personnes. Deux ou trois clans se groupaient sans doute dans un village, mais il ne s'agit là que d'une spéculation. Nous ignorons à quoi



LE SOL MAGDALÉNIEN À ETIOLLES

Le sol magdalénien précautionneusement mis au jour par les préhistoriens sur le site d'Etiolles présente les vestiges d'un foyer qui se trouvait vraisemblablement à l'intérieur d'une tente de peau, même si les pierres qui servaient à la caler ne sont plus présentes. Autour, des restes sont massés, là où probablement des Magdaléniens se sont assis sur le sol afin de se livrer à des activités artisanales telles que la taille ou la confection d'armes.

ressemblaient les habitations, mais la découverte de trous de poteaux entourés de grands blocs de pierre suggère que des piquets ancrés dans le sol soutenaient des couvertures de peau que ces poids bloquaient.

LES GRANDES RANDONNÉES ESTIVALES MAGDALÉNIENNES

En été (surtout), les Magdaléniens partaient en petits groupes pour de grands circuits le long de certains itinéraires. Ils n'établissaient sur leur chemin que de petits camps. Les indices matériels que l'on y trouve suggèrent que certaines de ces stations étaient dédiées à des activités spécialisées telles que la chasse ou l'approvisionnement en matière première. Lors de ces grandes randonnées estivales, les clans parcouraient souvent des centaines de kilomètres, puis retournaient dans leurs campements d'hivernage, comme en témoigne le très riche matériel archéologique que l'on y trouve. Des trous de poteaux, des dallages et des accumulations d'artefacts attestent que les tentes ou les huttes étaient montées toujours aux mêmes endroits. Ces grands habitats étaient aménagés pour toutes les activités de la vie quotidienne : cuisiner, manger, dormir... Des zones étaient réservées au traitement des proies et d'autres à la production artisanale, pour laquelle les chasseurs ramenaient de leurs grandes excursions des nodules de silex de qualité et des nucléus déjà apprêtés qu'ils exploitaient une fois sur leur campement.

Certaines zones de ces habitats étaient consacrées aux activités rituelles ou artistiques; les dessins de phoques que l'on y a découverts démontrent l'ampleur des circuits estivaux parcourus. Au cours de ces voyages, des rencontres avec d'autres groupes devaient se produire, ce qui n'a pu que faciliter la constitution d'une sorte de «réseau social magdalénien» paneuropéen. Les idées et les matières premières y circulaient. C'est du moins ce que suggèrent les vénus de Gönnersdorf, des représentations stylisées du corps féminin découvertes à Gönnersdorf sur un site magdalénien du bassin de Neuwied au nord du Land de Rhénanie-Westphalie. Entre la côte atlantique et les rives du Don (Russie), les Magdaléniens ont en effet dessiné, peint, gravé ou sculpté ce type de vénus des milliers de fois (*voir la photographie ci-dessous*). Leur signification exacte nous est inconnue, mais, clairement, elle était évidente pour tous au Magdalénien.

Cela implique qu'un sentiment d'identité commune existait à grande échelle et qu'un réseau d'échange stable le maintenait. Cela se note, du reste, aux milliers de kilomètres sur lesquels étaient transportés certains biens de prestige (rares) tels les coquillages servant de parures. Les chercheurs supposent que le réseau social de la fin du Magdalénien assurait la survie en temps de crise: si à cause de mauvais résultats à la chasse, un clan souffrait de la faim, un groupe apparenté pouvait l'aider en

lui fournissant des ressources ou en l'invitant à partager un terrain de chasse plus riche.

Lorsque les températures se sont mises à augmenter il y a 14 700 ans, les chasseurs-cueilleurs se sont accrochés aux traditions magdaléniennes, mais ont aussi commencé à les faire évoluer. Les archéologues constatent en effet qu'à cette période, les vestiges d'habitats successifs se chevauchent. L'organisation des villages est restée la même, mais on déplaçait les habitations d'une saison à l'autre, solution que l'on préférerait manifestement à un nettoyage suivi d'une reconstruction de l'habitat.

Dès que la forêt a commencé à conquérir le paysage, les sangliers, les aurochs, les cerfs, les chevreuils et les élans ont enrichi la palette alimentaire. Cette adaptation a eu lieu différemment d'une région à l'autre selon le degré de changement du paysage. La steppe herbeuse du sud du Bassin parisien a disparu beaucoup plus tôt que dans la vallée du Rhin ou dans les basses montagnes. Là où le régime alimentaire a changé, on devine désormais un usage bien plus insouciant des ressources en nourriture. Elles sont désormais plus grandes: il est clair que les gens de la période de transition se sentaient en sécurité. Ils chassaient moins souvent des petits mammifères et le bouillon d'os si typique des Magdaléniens n'était plus au menu.

VÉNUS MAGDALENIENNE

Les gravures magdaléniennes représentant de façon stylisée des corps de femme proviennent de la grotte de la Roche de Lalinde dans le Périgord. Elles sont très similaires aux gravures retrouvées à Gönnersdorf dans le Land de Rhénanie-Palatinat, qui ont défini un type de représentation du corps féminin observé dans toute l'Europe sous la forme de gravures ou de statuettes.



DES OS CARBONISÉS

Dans les sites de cette époque, au lieu d'éclats d'os, les archéologues déterrent des ossements carbonisés. Nous pensons que cela correspondait à une forme d'hygiène: comme les animaux chassés n'étaient plus utilisés au maximum, les restes menaçaient de se décomposer et d'attirer prédateurs et vermine. Cet emploi relativement insouciant des aliments n'a guère duré: vers 13 800 ans, soit un bon siècle après la fin de la vague de froid, les clans, devenus aziliens, ont remis les petits mammifères au menu. C'est notamment le cas du castor, ce qui suggère que sa queue très grasse était bouillie pour obtenir à nouveau du bouillon.

Les pointes de flèche que produisaient les groupes aziliens étaient plus faciles à fabriquer que les lames des sagaies magdaléniennes. La production de ces lames impliquait en effet un processus en plusieurs étapes, sans doute organisé socialement: les nucléus étaient mis en forme afin de faciliter la production en série; de longues lames y étaient ensuite débitées à l'aide de percuteurs en bois de renne; souvent courbes, elles devaient être cassées pour fournir des segments courts, que l'on travaillait ensuite afin de leur donner la taille et la forme nécessaires aux activités prévues.

Par contraste, les tailleurs des groupes aziliens avaient beaucoup moins de travail: ils débitaient les pièces de silex directement dans les

nucléus, puis leur donnaient ensuite la forme souhaitée pour en faire, par exemple, des pointes de flèche. Le large éventail des formes retrouvées suggère que cette approche était pragmatique et que la tendance à standardiser avait été abandonnée. La matière première utilisée n'était pas plus soumise à des exigences particulières, de sorte que l'on pouvait presque toujours se contenter des ressources lithiques que l'on trouvait là où l'on séjournait.

Ce pragmatisme se reflétait aussi dans la disposition des campements des clans aziliens. On travaillait là où l'on vivait; les zones fonctionnelles de l'habitat n'étaient guère différenciées. Apparemment, même la tradition des grands camps occupés pendant de longues périodes avait disparu. On ne trouve plus trace de stations permanentes, mais seulement de simples foyers: après leur arrivée quelque part, les clans repartaient au bout de quelques jours ou de quelques semaines. S'ils revenaient sur certains lieux encore et encore, sans doute à cause de riches territoires de chasse, ils y dressaient leurs tentes à côté de l'emplacement de la saison passée, ce que prouve la juxtaposition des complexes de vestiges.

DES CLANS PLUS MOBILES, MAIS SUR DE PETITES DISTANCES

Bien plus mobiles que les clans magdaléniens, les clans des groupes aziliens parcouraient pour autant des distances bien moindres que leurs ancêtres. Depuis que l'on pouvait se passer du silex de qualité supérieure servant à produire les lames, les longs déplacements n'avaient sans doute plus de sens. Avec le réchauffement d'il y a 14 700 ans, les marqueurs d'échanges entre régions qu'étaient les vénus sont aussi devenus de plus en plus rares, ce qui implique que les réseaux sociaux étendus de l'époque précédente avaient presque complètement disparu, comme la couche culturelle paneuropéenne uniforme de l'époque magdalénienne. Désormais, les traditions régionales prenaient le pas.

Bien que la chronologie que nous avons établie soit plus précise que celles qui l'ont précédée, elle laisse nombre de questions sans réponses. Un changement aussi profond de la société représentait un grand risque. Qui cesse d'employer des ressources de provenance lointaine perd inévitablement la connaissance de leur existence et de leur intérêt. Pour autant, les populations de la transition ne pouvaient savoir que le climat et le paysage évolueraient à long terme. Balançait-on entre tradition et innovation? Ou des processus d'adaptation trop lents pour que quelqu'un les perçoive dominaient-ils?

Après avoir tiré des données archéologiques les toutes premières manifestations de changement, l'une d'entre nous, Sonia Grimm,

DES ARMES AZILIENNES, SIMPLES ET EFFICACES

du nord de la France et le Bassin parisien ont livré quelques-uns des sites les mieux conservés de la fin du Paléolithique en Europe. Pendant cette période – le Tardiglaciaire – les cultures aurignacienne (17 000 à 12 500 BP) et azilienne (12 500 à 9 600 BP) se succèdent, tandis qu'un réchauffement climatique intensifie le couvert végétal. Les espèces inféodées à la forêt (cerf, chevreuil, sanglier...) remplacent petit à petit les espèces steppiques (renne, mammouth, bison...). Le cheval reste longtemps partagé entre Magdaléniens et premiers Aziliens.

Les archéologues fouillent certains des grands sites de la fin du Magdalénien et de l'Azilien du nord de la France depuis des dizaines d'années. C'est par exemple le cas de Pincevent, en Seine-et-Marne, et d'Étiolles, dans l'Essonne, depuis respectivement 1964 et 1972. Ces grands sites nous ont permis d'explorer des campements sur de très larges surfaces – par exemple sur 29 000 mètres carrés au Closeau, dans les Hauts-de-Seine –, mais aussi dans l'épaisseur du temps – sur pas moins de neuf niveaux stratifiés à Étiolles. Cette richesse archéologique a révélé précisément l'évolution des cultures humaines de ces périodes, à commencer par celle de l'armement de chasse.

Ainsi, dès la fin du Magdalénien, on voit l'armement des chasseurs se transformer à travers toute l'Europe de manière radicale. Les pointes de sagaies en bois de renne disparaissent au profit de pointes en silex plus rapides à fabriquer. Ces pierres taillées deviendront des armatures de prédilection des chasseurs pendant presque deux millénaires. Elles constituent les témoins les plus évidents des armes

utilisées par les chasseurs aziliens, car, sauf à de très rares exceptions, le bois des armes n'est jamais conservé. Un site d'Allemagne du nord où, dans les années 1930, on a découvert des flèches en bois associées à des pointes en silex constitue une exception notable, mais il est plus récent que l'Azilien.

Les transformations ont eu un impact sur les comportements des chasseurs et en particulier sur les pratiques de chasse, la fabrication des armes aux tactiques mises en place. En effet, chasser et abattre les hardes de rennes dans un paysage ouvert n'a rien à voir avec la chasse au cerf ou d'autres proies en milieu forestier. Or l'armement magdalénien, particulièrement élaboré et long à fabriquer, pouvait être récupéré sur la steppe, mais se serait perdu dans une végétation dense. Ainsi, le risque de perdre un matériel précieux dans un milieu très végétalisé a certainement poussé les chasseurs à envisager de nouvelles solutions techniques: fabriquer et remplacer une pointe en silex perdue ou cassée est en effet beaucoup plus rapide que de fabriquer une nouvelle pointe de sagaie en bois de cervidé.

Il faut aussi mettre en relation cette nouvelle façon d'armer ses projectiles avec l'apparition d'une innovation majeure: l'arc. Les preuves directes de son emploi sont cependant rares. L'absence, en France, de gisements où le bois a été conservé ne permet donc pas d'être totalement affirmatif sur son apparition ou sa réapparition puisqu'il peut-être été inventé puis abandonné. On sent cependant qu'il était présent dès le début de l'Azilien, sans doute parce qu'il était plus adapté à une chasse d'approche que le propulseur quand le tireur devait être plus réactif aux mouvements de la proie.

UDOVIC MEVEL
ArScan, CNRS

REDRESSEUR DE HAMPE

Généralement en grès et doté d'une rainure centrale, ce type d'instrument semble avoir été employé afin de redresser les hampes des fleches avant leur utilisation.



BIBLIOGRAPHIE

S. B. Grimm, **Resilience and re-organisation of social systems during the Weichselianateglacial in Northwest-Europe. An evaluation of the archaeological, climatic, and environmental records**, Monographien des RGZM, vol. 128, sous presse.

E. Caron-Laviolette, D. Bignon-Lau et M. Olive, **Re)occupation : Following a Magdalenian group through three successive occupations at Étiolles**, *Quaternary International* vol. 498, pp. 12-29, 2018.

Collectif, **Pincevent (1964-2014). 50 années de recherches sur la vie des Magdaléniens**, Centre archéologique de Pincevent et SPF, 2014.

J.-G. Rozoy, **Le propulseur et l'arc chez les chasseurs préhistoriques. Techniques et démographies comparées**, *Paléo*, vol. 4, 1992.

expliquerait en partie le petit nombre des découvertes archéologiques de cette phase. La vague de froid a par ailleurs marqué le passage définitif dans l'ère des groupes aziliens. Une explication possible de ce tournant serait que le système social déjà perturbé des Magdaléniens s'est alors complètement effondré, puisque ceux qui comptaient sur leurs propres forces plutôt que sur les règles rigides du système magdalénien avaient désormais plus de chances de survivre.

L'AVENEMENT DE L'AZILIEN

Après deux siècles vraisemblablement chaotiques, une réorientation se fait sentir à partir d'il y a 13 800 ans BP. L'expansion du couvert forestier s'accompagne d'un formidable plan de développement : bon nombre des innovations mises au point au cours des 1 000 dernières années, mais qui ne se sont répandues que sporadiquement, telles que l'arc et les flèches, dominant désormais. Elles jouent dorénavant un rôle essentiel dans les stratégies de survie des chasseurs-cueilleurs. Cela se produit très différemment d'une région à l'autre, selon la stratégie qui y réussit. Ainsi, alors qu'en Rhénanie, certains groupes utilisent déjà les pointes à dos courbe typiques de la culture azilienne et chassent le cerf rouge, dans la vallée de Somme d'autres groupes préfèrent chasser les aurochs à l'aide d'une plus grande variété d'armes de chasse. Une mosaïque de cultures similaires, quoique différentes, apparaît ainsi dans le nord-ouest de l'Europe.

Ce n'est qu'après la stabilisation des conditions climatiques et environnementales que les groupes reprennent contact et, au cours des 800 années suivantes, établissent le système culturel stable des Aziliens. Un système beaucoup plus souple, qui laisse plus de place à l'initiative et aux essais que le système rigide des Magdaléniens.

Il ressort de notre analyse qu'à la fin de la glaciation, les évolutions sociales ne furent pas synchronisées avec les évolutions climatiques. Elles les suivirent souvent avec environ un siècle de retard. Les sociétés résistaient même à des changements de l'environnement aussi drastiques que ceux qui ont marqué la fin du Weichsélien. Des vagues de froid aussi intenses que celles de la fin de cette période n'ont provoqué l'effondrement des comportements et des valeurs traditionnelles qu'après et seulement après que les innovations tentées par certains individus eurent démontré que des alternatives existaient. Finalement, le comportement des Européens de la fin de l'ère glaciaire montre que les règles d'une société, ses traditions et les mécanismes qui la régulent influencent davantage son évolution que les conditions climatiques, même extrêmes. ■

L'ESSENTIEL

La chaîne alimentaire des océans a longtemps été décrite comme reposant sur deux groupes d'organismes : le phytoplancton et le zooplancton.

En fait, de nombreux organismes planctoniques sont mixotrophes : pour se nourrir, ils utilisent à la fois

la photosynthèse, comme les plantes, et ingèrent d'autres organismes, comme les animaux.

Ces mixotrophes ont une influence majeure sur les efflorescences d'algues nocives, les populations de poissons et même le cycle global du dioxyde de carbone.

L'AUTEUR



ADITEE MITRA
spécialiste du zooplancton
et des organismes mixotrophes
à l'université de Swansea,
au Pays de Galles (Royaume-Uni)

Le plancton animal qui voulait devenir végétal

Certains microorganismes du plancton marin font de la photosynthèse, comme les plantes, et mangent d'autres organismes, comme les animaux. Les biologistes ont découvert que ces minuscules végétaux prédateurs jouent dans les océans un rôle bien plus important qu'on ne le pensait.

Dans les eaux chauffées par le soleil d'été des côtes espagnoles, paisibles en apparence, se déroule une bataille invisible à l'œil nu. La scène a lieu à proximité de la surface, dans un essaim d'organismes microscopiques du plancton. Certains sont rose orangé, d'autres vert sombre. Ils nagent paresseusement en cercles, tout en captant l'énergie fournie par le soleil pour produire par photosynthèse les nutriments nécessaires à leur survie.

Soudain, un microorganisme à tentacules, un *Mesodinium*, surgit en zigzaguant, attiré par les sucres et les acides aminés qui s'échappent

des autres organismes. Il ne dépasse pas les 22 micromètres, mais il fait figure de géant par rapport aux autres, qui mesurent 3 micromètres. Ses tentacules jaillissent et happent ses malheureuses proies vertes (des nanoflagellés) qui sont alors consommées et complètement digérées.

Avec ses proies de couleur rose (les cryptophytes), le prédateur est plus sélectif, bien que tout aussi brutal. Il les détruit et les digère en grande partie, mais il prend soin d'engloutir intacts leurs organites responsables de la photosynthèse, les chloroplastes et les nucléosomes. En quelques minutes, le *Mesodinium*, qui jusque-là était pâle, se pare d'une teinte



Un microorganisme mixotrophe, du genre *Dinophysis* (à droite), aspire les organites responsables de la photosynthèse d'un autre microorganisme du plancton, du genre *Mesodinium*.

DE LA SCIENCE

rouge sombre tandis qu'il assimile les organites de ses proies. *Mesodinium* n'est pas capable de produire lui-même ces éléments, donc de capter et d'utiliser le dioxyde de carbone comme le font les véritables organismes photosynthétiques. Il dépend donc des chloroplastes de ses victimes pour accomplir cette tâche. La double stratégie de cet organisme, qui consiste à la fois à chasser sa nourriture comme un animal et à utiliser la photosynthèse comme une plante, est nommée mixotrophie.

Toutefois, le *Mesodinium* ne profite pas bien longtemps de son butin. Non loin de là, un autre mixotrophe s'approche. Légèrement plus grand, ce dinoflagellé du genre *Dinophysis* a une méthode de chasse différente. Il tourne autour de sa proie et déploie des fils en forme de harpons qui immobilisent le *Mesodinium*. Le nouveau prédateur administre alors le coup de grâce : il perce sa cible grâce à un appendice, le pédoncule, par lequel il aspire, comme avec une paille, les entrailles de sa victime, notamment ses chloroplastes. Ces petites usines photosynthétiques sont alors assimilées par leur nouvel hôte auquel elles vont commencer à fournir de l'énergie. Les restes du premier voleur, le *Mesodinium*, dérivent avec le courant.

On a longtemps considéré les mixotrophes comme de simples curiosités

Ces tueurs unicellulaires ne sont que deux exemples parmi les innombrables microorganismes mixotrophes qui nagent dans les mers. La plupart des biologistes marins ont longtemps considéré les mixotrophes comme de simples curiosités, comparés aux deux principaux groupes d'organismes planctoniques supposés dominer le premier maillon de la chaîne alimentaire des océans. L'un de ces groupes, le phytoplancton, fonctionne d'une façon proche de celle des plantes. Ses membres utilisent l'énergie de la lumière du soleil et les nutriments inorganiques présents dans l'eau pour réaliser la photosynthèse. L'autre groupe, le zooplancton, fonctionne plutôt comme les animaux : ses membres se procurent leurs nutriments en

chassant et en mangeant du phytoplancton. De cette façon, les nutriments remontent la chaîne alimentaire vers les animaux plus grands.

Comparés à ces deux groupes «puristes», les organismes mixotrophes étaient considérés comme des sortes d'anomalies, qui jouent sur les deux tableaux sans être efficaces ni sur l'un ni sur l'autre. De la même façon, on ne connaît que quelques rares exemples de mixotrophes terrestres, telle la dionée attrape-mouche, une plante carnivore.

UNE VISION OBSOLETE DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

Cette conception classique de la chaîne alimentaire des océans est cependant obsolète. Grâce à une accumulation d'observations, d'expériences et de résultats de modèles de populations planctoniques, les biologistes ont mis en évidence ces dernières années que la plupart des organismes unicellulaires du plancton ne sont ni purement photosynthétiques, ni purement prédateurs. Les mixotrophes auraient ainsi un rôle bien plus important que nous le pensions. La dynamique du bas de la chaîne alimentaire – et par conséquent tout ce qui se trouve au-dessus – serait alors à revoir. Si une grande part des microorganismes du plancton sont effectivement mixotrophes, la croissance de leurs populations ne dépend pas seulement de la photosynthèse, mais aussi de la disponibilité des proies.

Par ailleurs, ces particularités des mixotrophes ont des répercussions sur divers aspects de l'environnement et de l'écosystème. Par exemple, une plus grande activité mixotrophe modifie la vitesse à laquelle les océans emmagasinent le dioxyde de carbone (gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique) et le confinent dans les sédiments des fonds marins.

Les mixotrophes sont aussi moins sensibles aux changements de luminosité liés aux saisons, leur capacité de prédation leur offrant une grande flexibilité d'adaptation. Les populations de mixotrophes peuvent ainsi nourrir davantage les larves de poissons, ce qui augmente les ressources en poisson pour l'alimentation humaine. Mais il peut aussi y avoir des effets négatifs. Certaines espèces mixotrophes engendrent des efflorescences algales, dont les émissions massives de toxines conduisent à la fermeture d'écloseries de crustacés et de mollusques et à la mort de grandes quantités de poissons.

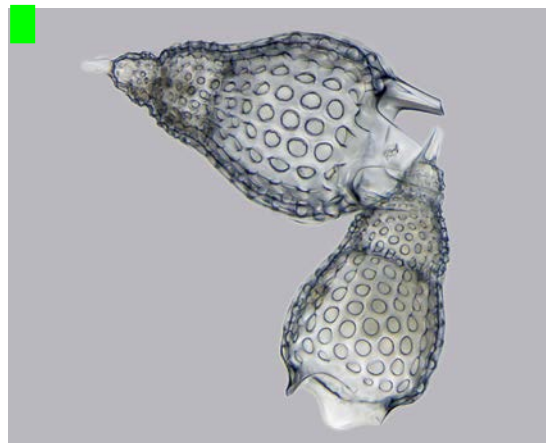
Ces quelques exemples montrent qu'il est important de prendre en compte ces étranges organismes que sont les mixotrophes. C'est donc un schéma plus riche et complexe qui a été élaboré ces dernières années par les spécialistes de la biologie marine.

A bien y regarder, les organismes mixotrophes semblent sortir tout droit d'un roman de



DES MONSTRES MINUSCULES

Il existe une grande variété de mixotrophes. Certains, comme *Tripos longipes* (1), sont capables de réaliser la photosynthèse par eux-mêmes. En revanche, d'autres, comme certaines espèces de l'ordre des Nassellaria (2), présentent des symbioses avec des organismes photosynthétiques. Les espèces du genre *Karlodinium* (3) fonctionnent comme *T. longipes*.



science-fiction. Les harpons et les pédoncules de *Dinophysis* rappellent, à plus petite échelle, les caractéristiques des plantes qui envahissent la Terre dans *Le Jour des triffides*, de l'auteur britannique John Wyndham. Dans ce roman paru en 1951, les triffides sont capables d'utiliser leurs racines pour extraire les nutriments du sol et pour se déplacer. Elles ont aussi des dards venimeux dont elles se servent comme des fouets pour aveugler ou tuer les humains, afin de se repaître de leurs cadavres.

J'ai entendu parler du plancton mixotrophe pour la première fois il y a un peu plus de dix ans, pendant mon doctorat qui portait sur le microzooplancton. À l'époque, les manuels décrivaient encore les mixotrophes comme l'étranges raretés des mers. Pourtant, avec la double capacité de chasser et de faire de la photosynthèse, combinée dans une seule cellule, les mixotrophes apparaissent à mes yeux comme des organismes parfaits. L'évolution ayant tendance à favoriser l'efficacité, j'étais surprise que la mixotrophie ne soit pas plus répandue dans le règne du vivant.

En cherchant à approfondir le sujet, j'ai découvert toute une série d'articles fascinants de Diane Stoecker, une spécialiste du plancton au laboratoire Horn Point, à l'université du Maryland, aux États-Unis. Depuis les années 1980, cette chercheuse et d'autres

avaient montré que la mixotrophie était loin d'être négligeable dans le plancton océanique. Je l'ai contactée et les discussions que j'ai eues avec elle m'ont convaincue que les mixotrophes n'étaient pas rares dans la nature. Mais il restait à savoir combien ils étaient et quel était leur impact dans l'écosystème.

L'N'EXISTAIT AUCUN MODELE PRENANT EN COMPTE LES MIXOTROPHES

Je suis spécialisée dans le développement de modèles mathématiques et de simulations numériques qui décrivent les chaînes alimentaires afin de comprendre le comportement des divers organismes impliqués. Parmi les modèles d'écosystèmes océaniques existants, je n'en ai pas trouvé un seul capable de simuler les détails de la double vie des mixotrophes. À l'époque, l'idée de mettre au point un tel modèle intéressait peu les comités scientifiques. En l'absence de financement pour ce projet, j'y travaillais le soir avec mon mari, Kevin Flynn, spécialiste de biologie marine. Au printemps 2009, notre simulation fonctionnait et était capable de représenter différentes populations de mixotrophes, certaines davantage tournées vers la prédation, d'autres vers la photosynthèse. Nous avons publié nos résultats cette même année dans une revue spécialisée.

Notre objectif était de montrer qu'un modèle incluant les mixotrophes simulait l'écologie marine de façon plus réaliste que les modèles qui ne distinguaient dans les populations océaniques que des prédateurs ou des plantes. Nous avons donc ajusté les caractéristiques des mixotrophes au sein du modèle jusqu'à ce que nos simulations se rapprochent du plus près des observations réelles des flux de nutriments au sein des chaînes alimentaires, mais aussi des interactions avec d'autres organismes du plancton tels que les bactéries et les copépodes (de minuscules crustacés). Ces dynamiques de la chaîne alimentaire différaient des modèles classiques sans mixotrophes.

Toutefois, nous avions besoin d'aller au-delà des simulations. Nous devions rassembler les preuves permettant d'appuyer notre hypothèse selon laquelle les mixotrophes jouaient un rôle clé dans les flux de nutriments en milieu océanique et au sein de tous les organismes qui y vivent. Suite à ces travaux, plusieurs congrès ont permis aux chercheurs qui travaillaient sur les mixotrophes, sur le terrain et en laboratoire, de partager leurs connaissances.

Lors d'un congrès, en 2011, notre groupe (que nous avions surnommé «l'équipe mixotrophe») a dressé une liste de toutes les espèces planctoniques connues à la fois pour ingérer d'autres organismes et pour pratiquer la photosynthèse.

Au fil des décennies, les scientifiques avaient identifié des espèces mixotrophes dans les échantillons d'eau prélevés dans tous les systèmes marins, des milieux côtiers jusqu'aux zones situées en plein océan, des pôles jusqu'à l'équateur. Ils ont mené des expériences dans les laboratoires embarqués sur des navires de recherche et ont parfois ramené du plancton dans leurs instituts respectifs pour réaliser des études complémentaires. Ils ont exposé les mixotrophes à divers nutriments, proies et intensités lumineuses pour comprendre comment ces organismes se comportent dans différentes conditions.

DES FORMES DE VIE FRÉQUENTES DANS LES OCÉANS

Avant que l'«équipe mixotrophe» ne commence à rassembler ces observations, la plupart des chercheurs pensaient qu'ils avaient affaire à des cas particuliers et non à une forme de vie commune dans tous les océans du globe.

La compilation de toutes ces données nous a fait constater que la mixotrophie est fréquente dans les mers et qu'elle est essentielle sur le plan écologique. Par exemple, Per Juel Hansen, écophysiologiste à l'université de Copenhague, et ses collègues ont montré que sans un nombre suffisant de cryptophytes (les proies roses mentionnées en début d'article), la population de *Mesodinium* serait incapable

l'acquérir des chloroplastes et finirait par disparaître. Diane Stoecker et son équipe, ainsi que Hae Jin Jeong et ses collègues de l'université de Séoul, ont montré que lorsque les mixotrophes ont une activité photosynthétique, ils se nourrissent de davantage de plancton que si la photosynthèse n'est pas active. Ainsi, un processus renforce l'autre. Et lorsque la lumière et les nutriments sont présents en abondance, ces mêmes mixotrophes prolifèrent bien plus rapidement que le plancton ne faisant appel qu'à un seul processus.

En 2012, nous avons voulu aller plus loin que la constatation de la présence de ces orga-

Une grande activité mixotrophe augmente la capacité des océans à capturer le CO₂

nismes dans les écosystèmes marins. Nous avons commencé à identifier divers groupes en fonction de la nature de leur alimentation, de la manière dont ils se nourrissent et de celle dont ils réalisent la photosynthèse. Nous avons ainsi mis en évidence quatre groupes distincts, chacun occupant une place spécifique au sein d'un spectre de comportements.

Le premier critère de distinction était l'origine des capacités photosynthétiques (voir l'encadré ci-contre). Celles-ci sont-elles inhérentes, ou l'organisme doit-il se procurer les organites photosynthétiques des proies? Nous avons nommé mixotrophes constitutifs le groupe doté du matériel génétique permettant de produire et maintenir les photosystèmes.

Ce groupe comprend de nombreux membres inoffensifs mais cruciaux au sein des chaînes alimentaires océaniques. Il inclut cependant aussi des fauteurs de troubles capables de produire des efflorescences algales destructrices lorsque leur prolifération devient hors de contrôle. Par exemple, le mixotrophe *Karlodinium* est connu pour tuer fréquemment de grands nombres de poissons partout dans le monde, de la baie de Chesapeake, aux États-Unis, aux eaux côtières de la Malaisie. Un autre mixotrophe constitutif, *Prymnesium*, a provoqué à plusieurs reprises la mort de poissons au large

QUATRE GROUPES DE MIXOTROPHES

Les scientifiques pensaient que le microplancton, l'ensemble des organismes marins unicellulaires, se nourrissait uniquement de deux catégories, ceux qui se nourrissent comme les plantes et ceux qui se nourrissent comme les animaux. De nouvelles études montrent

que la plupart de ces microorganismes sont en fait mixotrophes : ils font de la photosynthèse (comme les plantes), mais ingèrent d'autres microorganismes (comme les animaux), selon des modes variés. Les biologistes les répartissent en quatre grandes familles, indiquées ci-dessous.

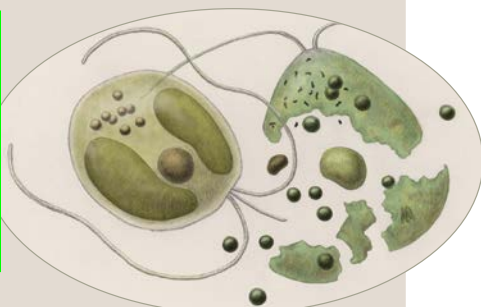
MICROZOOPLANKTON

Des organismes n'ont aucune capacité similaire à celles des plantes, qui vivent grâce à la photosynthèse. Ils doivent donc se nourrir d'autres organismes pour vivre.

MIXOTROPHES

MIXOTROPHES CONSTITUTIFS

Ces cellules prédatrices disposent d'une physiologie qui leur permet aussi de faire de la photosynthèse. L'un de ces protistes, *Pyramnesium parvum*, est représenté ci-contre en train d'attaquer *Dunaliella tertiolecta*.



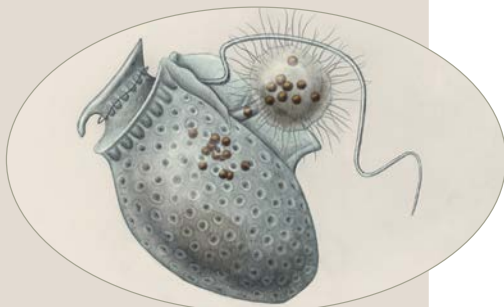
MIXOTROPHES NON CONSTITUTIFS, GÉNÉRALISTES

Ces organismes exploitent les organites photosynthétiques extraits de leurs diverses proies. Ici, *Strombidium oculatum* est en train de subtiliser les éléments de sa victime, un membre du genre *Ulv*.



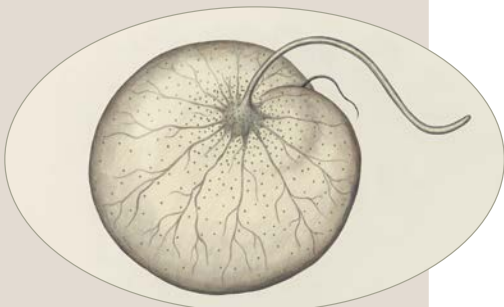
MIXOTROPHES NON CONSTITUTIFS, SPÉCIALISTES ET PLASTIDIQUES

Ces prédateurs s'attaquent à des proies spécifiques et en prélèvent certaines parties, ce qui les tue. Ici, *Dinophysis acuminata* aspire les organites de *Mesodinium rubrum*.



MIXOTROPHES NON CONSTITUTIFS, SPÉCIALISTES ET ENDOSYMBIOTIQUES

Les organismes de ce groupe conservent en leur sein des colonies de proies photosynthétiques. Ici, *Noctiluca scintillans* est rempli de *Pedinomonas noctilucae*.



MICROPHYTOPLANKTON

Les organismes de ce groupe vivent de la photosynthèse, comme les plantes terrestres.

Microparasite

NON

Peut-il faire de la photosynthèse

OU

NON

Peut-il se nourrir d'autres organismes

OU

Peut-il faire de la photosynthèse par lui-même ?

NON

OU

Asspire-t-il des proies photosynthétiques

OU

NON

Contient-il des colonies de microorganismes photosynthétiques dans son corps

OU

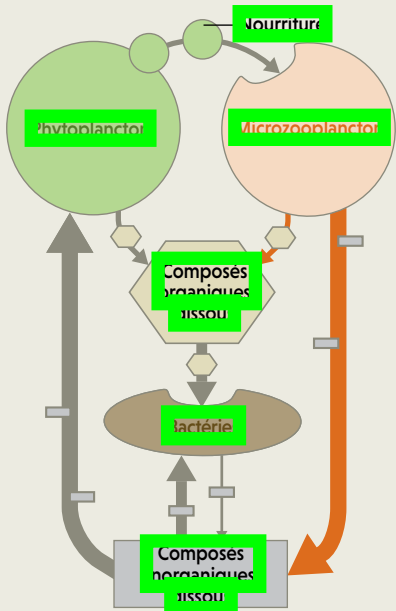
NON

L'EFFET MIXOTROPHE

La prise en compte des microorganismes planctoniques mixotrophes dans les modèles écologiques montre que cette composante du plancton joue un rôle notable. Les flux de nutriments au sein de la chaîne alimentaire et la dynamique des populations sont fortement modifiés. On observe aussi des effets sur le cycle global du carbone. Par ailleurs, les chercheurs ont développé divers modèles de mixotrophes pour les comparer avec les anciens scénarios n'incluant que le phytoplancton et le zooplancton. Ces modèles conduisent à des résultats qui s'accordent mieux avec les observations.

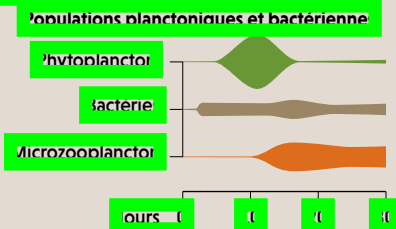
SCENARIO SANS MIXOTROPHES

Les organismes du phytoplancton utilisent l'énergie solaire et la matière inorganique pour se nourrir. Ceux du zooplancton les mangent. Les bactéries marines décomposent les déchets organiques et les recyclent. Les contraintes de ce cycle limitent la taille des populations.

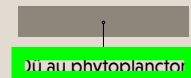


SEQUENCE CLASSIQUE « UN-DEUX »

Sur un cycle de trente jours, le phytoplancton (en vert) commence par proliférer. C'est seulement ensuite que le microzooplancton (en orange) peut se nourrir suffisamment pour que ses populations augmentent. Cette consommation diminue les populations de phytoplancton.

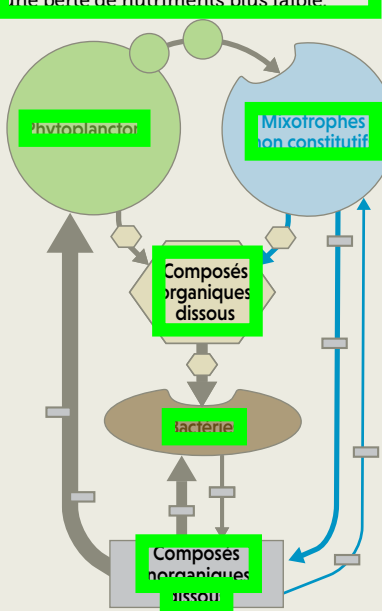


Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
10 grammes de carbone par mètre cube



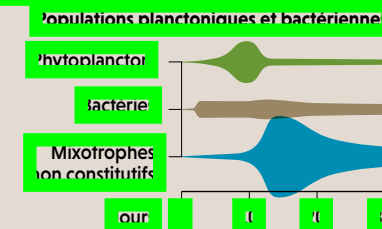
ANIMAUX PHOTOSYNTHETIQUES

Lorsque les mixotrophes dits non constitutifs remplacent le microzooplancton, davantage de nutriments sont retenus, grâce aux capacités hybrides (photosynthèse et ingestion d'autres microorganismes). Les fines flèches bleues indiquent une perte de nutriments plus faible.

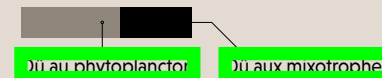


EXPLOSION DE LA POPULATION

Les populations de mixotrophes (en bleu) augmentent plus que celles du microzooplancton, en raison du gain d'énergie donné par les parties photosynthétiques extraites de leurs proies. Toutefois, leur croissance s'interrompt et s'inverse lorsque les mixotrophes ne trouvent plus d'organites à subtiliser.

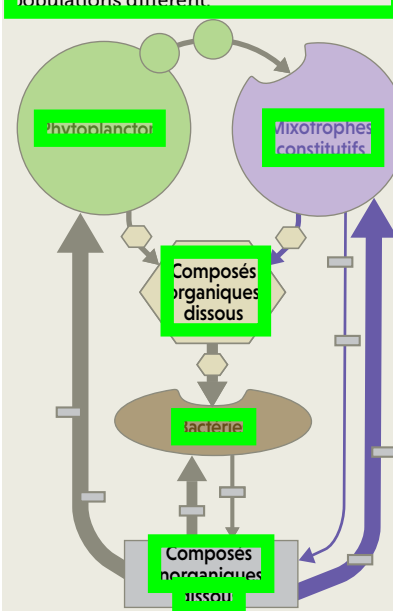


Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
10 grammes de carbone par mètre cube



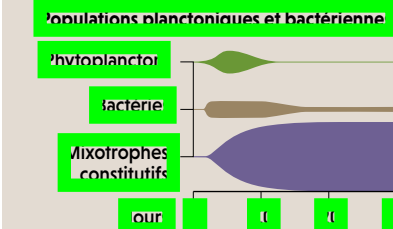
DES PLANTES QUI MANGENT

Les mixotrophes dits constitutifs ont les capacités photosynthétiques propres. Ils consomment beaucoup de matière inorganique (grosse flèche violette) et agissent aussi comme des prédateurs. Cela sustente le groupe sur une plus grande durée et on obtient un profil de populations différent.

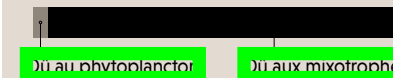


CROISSANCE AUTOSUFFISANTE

Grâce à leurs capacités photosynthétiques propres, les mixotrophes constitutifs (en violet) dépendent peu du phytoplancton classique pour croître. Leur population augmente rapidement et reste importante pendant trente jours.



Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
15 grammes de carbone par mètre cube



du Texas et dans les eaux du parc britannique The Broads. Il libère une toxine qui dégrade les membranes cellulaires des microorganismes rivaux du plancton. Résultat : ces cellules gonflent, explosent et *Prymnesium* consomme les débris. Les poissons sont des victimes collatérales, les toxines s'attaquant par exemple aux cellules des branchies des poissons. Une autre espèce encore, *Alexandrium*, produit une toxine qui s'introduit dans les mollusques. Les producteurs de fruits de mer sont alors contraints de fermer leurs exploitations en raison du risque d'intoxication des consommateurs par une phyto toxine aux effets paralysants.

Les espèces du second groupe, les mixotrophes non constitutifs, n'ont pas les outils nécessaires pour faire la photosynthèse. Elles doivent donc se les procurer. Parmi elles, on retrouve *Mesodinium* et *Dinophysis*. On a d'abord pensé que la photosynthèse, chez les membres de ce groupe, était un mécanisme de survie complémentaire, utilisé uniquement si les proies n'étaient pas assez nombreuses. En réalité, ces mixotrophes exploitent l'énergie solaire bien plus qu'on ne le pensait.

On peut subdiviser les mixotrophes non constitutifs en espèces généralistes et spécialistes. Les ciliés *Laboea* et *Strombidium*, par exemple, sont généralistes et subtilisent les chloroplastes de nombreux types de microorganismes. Les généralistes ne peuvent pas préserver les organites pillés plus de quelques jours et doivent constamment s'attaquer à de nouvelles proies pour les renouveler. En contribuant activement au flux des nutriments dans les chaînes alimentaires, ils jouent ainsi un rôle régulateur parmi les populations planctoniques. Ils sont donc involontairement très utiles pour protéger les pêcheries.

SYMBIOSE AVEC DES MICROORGANISMES PHOTOSYNTHÉTIQUES

Les mixotrophes non constitutifs spécialistes, en revanche, ne dépendent que d'un type particulier de proie et semblent mieux équipés pour intégrer les organites étrangers à leur propre organisme. Ils sont capables de conserver les photosystèmes dérobés entre quelques semaines et plusieurs mois. Certains, comme *Dinophysis*, sont toxiques. La consommation de coquillages exposés à *Dinophysis* peut provoquer des gastro-entérites chez l'homme. Ainsi, l'efflorescence massive de ces organismes, comme cela arrive dans le golfe du Mexique, est une menace pour les fermes aquacoles, qui doivent fermer lors de tels épisodes.

Certains mixotrophes non constitutifs spécialistes peuvent encore être classés dans un autre groupe caractérisé par un comportement particulier, l'endosymbiose. Ils ne se contentent pas de subtiliser certains fragments de leurs

proies, comme le fait *Mesodinium*, mais capturent des colonies entières de proies photosynthétiques. Les colonies vivent et prolifèrent au sein de leur hôte, en se nourrissant de nutriments qu'il produit et en profitant de sa protection contre d'autres prédateurs. Cette association profite tant aux proies qu'au mixotrophe. C'est donc une symbiose, que l'on qualifie d'endosymbiose puisque les proies vivent à l'intérieur du mixotrophe.

Des microorganismes du phytoplancton vivent à l'intérieur de certains mixotrophes

Ces sortes de serres planctoniques contiennent des microorganismes nommés foraminifères (ce groupe a un rôle crucial dans le cycle global du carbone : ses membres en absorbent d'immenses quantités de cet élément, le séquestrent lorsqu'ils coulent vers le fond et le relarguent en plus petites quantités lorsqu'ils se décomposent) et radioaires, et on les trouve partout dans les océans. Elles ne sont pas toutes inoffensives. En particulier, l'une d'elles, *Noctiluca*, peut donner lieu à des efflorescences nocives dans les eaux côtières polluées.

Entre organismes que l'on peut qualifier de végétaux prédateurs et ceux qui sont des animaux pratiquant la photosynthèse, entre minuscules organismes de deux micromètres et animalcules atteignant le millimètre, les mixotrophes étendent leur influence à de nombreux aspects de la vie océanique.

Par exemple, il existe une vaste région pauvre en nutriments qui couvre des milliers de kilomètres carrés au milieu de l'océan Atlantique. Les scientifiques pensaient que, dans cette zone, le phytoplancton entraînait en compétition avec les bactéries marines pour se procurer des nutriments inorganiques solubles tels que le fer et le phosphate, ressources rares en ces endroits.

Cependant, Mikhail Zubkov, chercheur au Centre d'océanographie britannique, et ses collègues ont découvert en 2008 une population importante de mixotrophes constitutifs – ceux qui font la photosynthèse par eux-mêmes – dans

MIXOTROPHIE ET POMPE BIOLOGIQUE À CARBONE

Des récents projets, telle l'expédition *Tara Océans*, qui a débuté en 2009, ont permis de préciser la dynamique entre les différents types de plancton: le phytoplancton, ou plancton végétal, autotrophe (qui pratique l'autoalimentation et la photosynthèse); le zooplancton, ou plancton animal, hétérotrophe (qui se nourrit des autres); et les mixotrophes, qui combinent autotrophie et hétérotrophie. Grâce à ces résultats, les chercheurs ont aussi déterminé le rôle du plancton dans la séquestration du carbone atmosphérique *via* la pompe biologique à carbone.

En effet, l'océan profond est le plus grand réservoir de carbone de la planète. Il a emmagasiné à lui seul un tiers du dioxyde de carbone (CO₂) émis depuis le début de l'ère industrielle. Ce carbone est séquestré au fond des océans par un ensemble de processus physico-chimiques et biologiques qui constituent la «pompe à carbone océanique».

Au sein de ces mécanismes, la pompe biologique assure le transfert du CO₂ atmosphérique vers l'océan profond *via* la photosynthèse. Dans ce pompage, le CO₂ d'origine atmosphérique est fixé par l'activité photosynthétique des microorganismes marins autotrophes ou mixotrophes. Il subit ensuite une série de transformations conduisant à sa séquestration en profondeur principalement sous forme de particules, surnommées «neige marine» en 1951 par la biologiste marine et écologiste américaine Rachel Carson. Cette neige, produite à la fois par les autotrophes, les hétérotrophes et les mixotrophes, est composée de déchets, d'organismes morts, etc. La mixotrophie

joue un rôle important dans ce processus puisqu'elle intervient à la fois au niveau du transfert du CO₂ atmosphérique vers l'océan *via* la photosynthèse et de son transport vers le fond *via* la production de particules marines.

Des études avaient montré que le flux de carbone vers les profondeurs dépend de la composition de la communauté planctonique de surface. Mais les informations sur cette communauté restaient très limitées, notamment à cause de sa complexité et des méthodes d'observation dont disposaient les chercheurs. Les récents développements techniques en matière de séquençage massif ont permis d'appréhender le système vivant depuis

**La mixotrophie intervient
via la photosynthèse
et *via* la production
de particules marines**

à l'échelle de la molécule jusqu'à l'écosystème. Ces nouvelles mesures collectées au cours de l'expédition *Tara Océans* ont conduit à une description quasi complète du catalogue d'organismes planctoniques incluant virus, procaryotes et eucaryotes. Couplées à des approches informatiques poussées, ces mesures ont mis en évidence la richesse et la complexité des interactions qui relient ces organismes. À partir de l'ensemble de ces informations, avec nos collègues, nous avons décrit le réseau d'espèces, ou «Facebook du plancton», liées à la pompe biologique des océans.



Dans ce dinoflagellé *Ornithocercus magnificus*, observé dans la baie de Villefranche-sur-Mer, les petites billes orangées sont des cyanobactéries symbiotiques.

Au sein de ce réseau, de nombreux acteurs, tels que certaines algues photosynthétiques (en particulier des diatomées) ou des organismes du zooplancton (des copépodes), étaient déjà connus comme ingrédients majeurs de la pompe biologique. Mais l'implication de certains microorganismes (parasites unicellulaires, cyanobactéries et virus) dans la séquestration du carbone était jusqu'alors très sous-estimée. En particulier, ce réseau contient de nombreux mixotrophes, tels les dinoflagellés *Noctiluca* ou les collodaires, des radiolaires unicellulaires marins qui appartiennent au super-groupe des *Rhizaria*.

Les radiolaires sont très intéressants parce que certaines de ces espèces mixotrophes vivent en symbiose avec des microalgues intégrées à leur cytoplasme, et on a très longtemps sous-estimé leur abondance. Un autre cas de symbiose pertinente ici est celle entre les algues procaryotes, les cyanobactéries, et des dinoflagellés tels que les *Ornithocercus* (voir la photographie ci-dessus). Il reste beaucoup d'aspects à étudier: par exemple, nous ne savons toujours pas à qui profite le plus la symbiose entre l'hôte hétérotrophe et son symbiote autotrophe.

Connaître la structure de ces réseaux et le mode trophique des organismes qui le compose ouvre de nombreuses perspectives, notamment la possibilité de mieux appréhender l'impact de ces organismes sur l'environnement et, à l'inverse, du changement de l'environnement sur ces communautés.

JONEL GUIDI ET JOHN DOLAN
Laboratoire d'océanographie
de Villefranche-sur-Mer

cette zone, lorsqu'ils ont prélevé des échantillons d'eau lors de leurs expéditions.

A partir de ces observations, mes collègues et moi avons développé deux simulations de chaîne alimentaire. Nous avons trouvé que la simulation prenant en compte la mixotrophie correspondait le mieux aux quantités de nutriments – et à leur cycle de renouvellement – mesurées par Mikhail Zubkov. Au lieu d'être en compétition avec le phytoplancton, les bactéries croissent en utilisant les sucres et autres nutriments libérés par les mixotrophes. Ceux-ci se nourrissent des bactéries, qui leur fournissent plus de fer et de phosphate qu'ils n'en pourraient extraire directement de l'océan. Et le modèle n'était en accord avec les observations que si les mixotrophes en question étaient constitutifs (voir l'encadré page 55).

Un autre élément clé est à prendre en compte. Avec les mixotrophes, et non avec le phytoplancton classique, les niveaux de fixation du carbone – la quantité de dioxyde de carbone extraite de l'eau de mer par les organismes – augmentent notablement. Nos découvertes suggèrent que si ces organismes hybrides n'étaient pas présents, la quantité globale de carbone qui circule entre l'eau de mer et l'atmosphère (et qui contribue au réchauffement climatique sous la forme de dioxyde de carbone), pourrait être bien plus importante qu'elle ne l'est.

LES MIXOTROPHES SONT AU CŒUR DE PLUSIEURS PROBLÉMATIQUES

Comme nous l'avons évoqué, les mixotrophes sont présents dans les eaux côtières, et ils peuvent avoir un impact important sur la pêche et l'aquaculture. En 2017, nous avons utilisé un modèle de plancton de la mer du Nord intégrant divers types de mixotrophes et avons découvert que lorsque de petits mixotrophes mangent des bactéries marines, leur population croît suffisamment pour surclasser d'autres microorganismes qui tendent à produire des efflorescences algales. Même lorsqu'elles ne sont pas toxiques, ces proliférations sont une source de problèmes pour les élevages de poissons. En effet, l'accumulation de plancton à la surface de la mer bloque la lumière du soleil, ce qui perturbe le cycle des nutriments nécessaires à la croissance des larves. Moins d'efflorescences signifie donc plus de poissons.

Concernant la santé des poissons, il est aussi important que les mixotrophes soient la forme prévalente de plancton en été. Le phytoplancton au sens strict prospère au printemps, mais les populations déclinent ensuite; les fragiles larves de poissons ne peuvent donc pas dépendre de lui, sans quoi elles ne trouveraient pas assez de nourriture en été. Les

mixotrophes, en revanche, sont présents en permanence et constituent une source de nourriture riche et viable.

Les mixotrophes sont au cœur de plusieurs problématiques: la pêche, la prévision d'efflorescences algales destructrices, le changement climatique ou encore la reconstitution des cycles passés du carbone. Le défi, désormais, est de réussir à associer les observations réelles et nos simulations pour comprendre ce

Près des côtes, les mixotrophes ont un impact sur la pêche et l'aquaculture

que font les divers groupes de mixotrophes en fonction de leur localisation et des saisons. C'est important car, tandis que notre climat change, nous devons savoir quelles conditions environnementales peuvent conduire à la prolifération du *Karlodinium* toxique, du *Noctiluca* vert, dangereux pour les écosystèmes, ou encore des ciliés ayant un rôle protecteur en aquaculture. Nous avons franchi la première étape vers cet objectif en cartographiant la présence de différents groupes de mixotrophes à travers les mers du monde. Nous devons encore estimer la taille de leurs populations durant les diverses saisons, car les changements de luminosité et de température ont une forte influence sur leur croissance et leur prolifération.

Il est important de garder en tête que nos conclusions ne peuvent se fonder uniquement sur des simulations. Nous avons donc besoin de récolter davantage de données réelles, non pas en laboratoire, mais *in situ*, directement dans les océans.

En 2017, la Commission européenne a accepté de financer un projet dont l'objectif est de former des chercheurs à faire ces analyses en mer. L'équipe mixotrophe, qui s'agrandit sans cesse, va pouvoir accélérer la mise en place de la prochaine génération de chercheurs. Ensemble, nous espérons comprendre en détail comment des organismes aussi minuscules ont une influence aussi importante sur le monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. K. Stoeker et al., **Mixotrophy in the marine plankton**, *Annual Review of Marine Science*, vol. 9, n° 311-335. 2017.

J. Guidi et al., **Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean**, *Nature*, vol. 532, n° 465-470. 2016.

A. Mitra et al., **Defining planktonic protist functional groups on mechanisms for energy and nutrient acquisition**, *Protist*, vol. 167(2), n° 106-120. 2016.

C. J. Flynn et A. Mitra, **Building the « perfect yeast » : Modelling mixotrophic plankton**, *Journal of Plankton Research*, vol. 31(9), n° 965-992. 2009.

Pleins feux sur les premières galaxies

Les astronomes commencent à observer les galaxies les plus anciennes de l'Univers. Ce qui ouvre une fenêtre sur une période quasi inconnue de l'histoire cosmique.

L'histoire de l'Univers a commencé il y a près de 13,8 milliards d'années, avec le Big Bang. Les cosmologistes et les astrophysiciens ont construit un modèle qui donne une vision globale assez précise de l'évolution de l'Univers depuis sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Mais certains épisodes qui restent encore mal connus pourraient bientôt se dévoiler, notamment ceux concernant la naissance des premières étoiles et galaxies. En effet, les astronomes ont récemment observé des galaxies remontant à quelques centaines de millions d'années après le Big Bang.

La lumière d'une de ces galaxies, nommée SPT0615-JD, a entamé son voyage vers la Terre il y a 13,3 milliards d'années. Elle a été observée pour la première fois en 2017 grâce au télescope spatial *Hubble*, dans le cadre du projet que je dirige: *Relics* (*Reionization, Lensing Cluster Survey*). Ce programme a été conçu précisément pour détecter des galaxies parmi les premières formées dans le cosmos. Le relevé *Relics* a collecté des données entre octobre 2015 et octobre 2017, en accumulant plus de 100 heures d'observation sur le télescope *Hubble*, et plus de 900 heures sur le télescope spatial *Spitzer*. Le projet a permis de

L'ESSENTIEL

► Réalisé au moyen du télescope spatial *Hubble*, le relevé *Relics Reionization Lensing Cluster Survey* a traqué certaines des plus anciennes galaxies de l'Univers.

► Pour y parvenir, les chercheurs ont utilisé l'effet de lentille gravitationnelle. Lorsqu'un objet massif tel qu'un amas de galaxies

courbe l'espace-temps environnant, il peut amplifier la lumière provenant d'une galaxie en arrière-plan, qui aurait été indétectable sans cet effet.

► *Relics* a ainsi découvert plus de 300 galaxies anciennes, dont l'une date de l'époque où l'Univers n'avait qu'environ 300 millions d'années.

L'AUTEUR



DAN COE
Astronome à l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore, aux États-Unis, et responsable du projet *Relics*

Parce que l'espace-temps se déforme au gré de la présence d'objets massifs, la lumière emprunte des trajets parfois déviés. Il en résulte, comme sur cette vue d'artiste, que des galaxies lointaines apparaissent déformées (comme des arcs de cercle), plus brillantes ou présentes en plusieurs exemplaires.

détecter plus de 300 galaxies remontant au premier milliard d'années de l'Univers.

Ces objets sont fascinants parce qu'ils fournissent un aperçu d'une période de l'histoire cosmique qui nous est encore inconnue. En étudiant ces galaxies, nous espérons comprendre comment les premières d'entre elles se sont formées et ont influé sur l'évolution de l'Univers jeune. Par exemple, nous pensons que des galaxies telles que SPT0615-JD (voir l'image ci-contre) ont transformé le contenu de l'espace primordial en émettant des bouffées de rayonnement ultraviolet. Ces émissions de haute énergie ont arraché les électrons des atomes d'hydrogène neutre qui emplissaient l'Univers, les faisant revenir à leur état ionisé initial. On parle de la période de «réionisation», mais les détails de ce processus sont assez mal connus. Avec un peu de chance, les galaxies anciennes que nous commençons à observer nous révéleront de nombreuses informations.

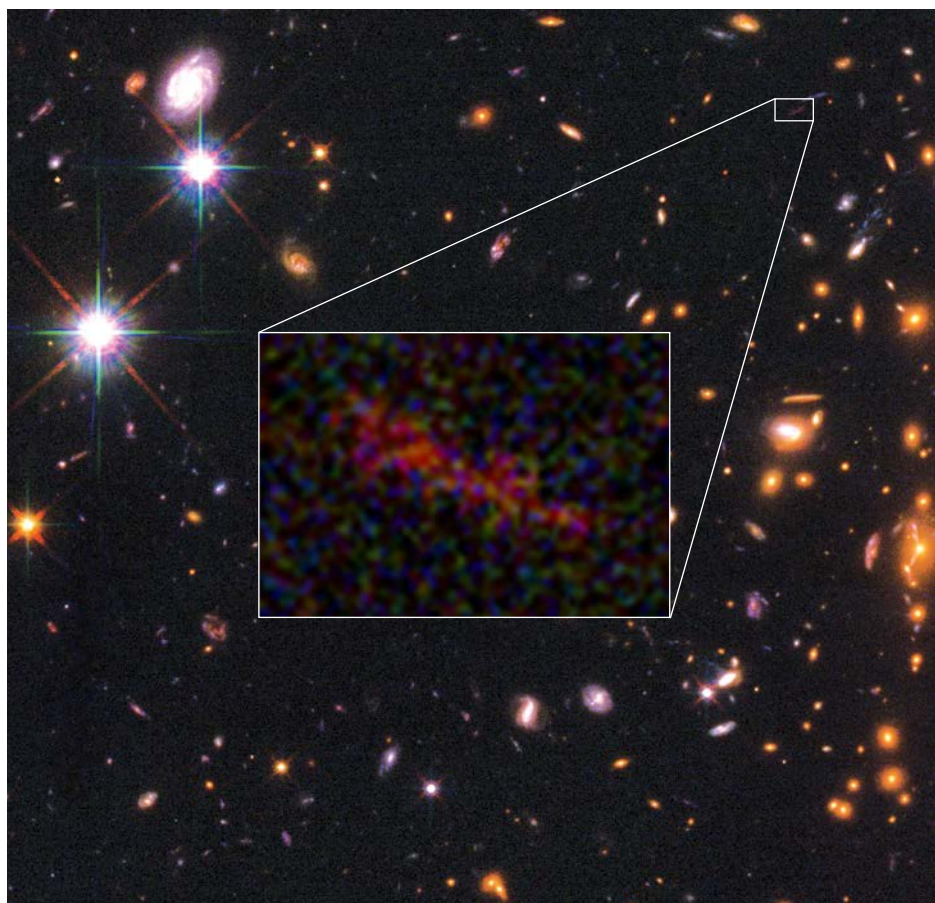
LES PREMIÈRES GALAXIES ÉTAIENT « PURES » ET PETITES

Les galaxies de la première génération ne ressemblaient pas à celles que nous connaissons aujourd'hui. Elles étaient plus «pures», composées presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium gazeux. Avec le temps, les étoiles de ces galaxies ont produit, par fusion thermonucléaire, des éléments plus lourds. Puis, quand ces étoiles sont arrivées en fin de vie, elles ont explosé sous la forme de supernovæ, produisant encore d'autres éléments et les dispersant dans l'espace voisin. Elles ont enrichi les galaxies en «matériau stellaire», dont les éléments nécessaires à l'apparition de la vie.

Les premières galaxies ne formaient pas encore de majestueuses spirales ou des boules ellipsoïdales comme les galaxies que nous voyons aujourd'hui dans le voisinage de la Voie lactée. Elles étaient beaucoup plus désordonnées et beaucoup plus petites (ce qui les rend encore plus difficiles à trouver). Les premières galaxies que nous avons vues faisaient environ 1 % de la taille de la Voie lactée, mais leur croissance était rapide, et elles formaient de nouvelles étoiles à des vitesses prodigieuses. En effet, le combustible (le gaz hydrogène) était alors présent en abondance, sous la forme de nuages et de «courants froids» capturés par l'attraction gravitationnelle des galaxies.

Par ailleurs, ces dernières entraient souvent en collision les unes avec les autres; ces fusions ont accéléré leur croissance et ont déclenché des flambées de formation stellaire. Avec l'expansion de l'Univers, les fusions de grandes galaxies sont devenues plus rares, les réserves de gaz se sont réduites. La croissance des galaxies s'est peu à peu ralentie.

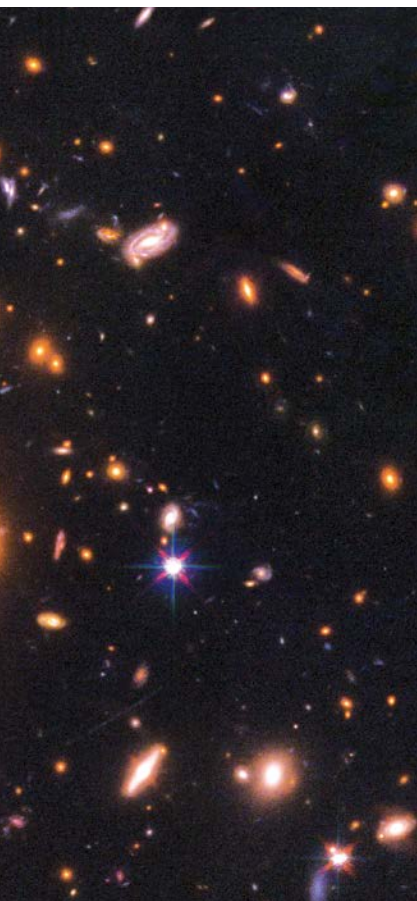
Tel est, dans les grandes lignes, le tableau que nous nous faisons de l'évolution des



galaxies. Nous travaillons encore à y apporter des détails, et de nombreuses questions subsistent, en particulier concernant les époques les plus reculées. Quand les premières galaxies se sont-elles formées? Elles étaient petites, mais quelle était leur taille plus précisément? Quelle forme prenaient-elles? Présentaient-elles toutes une formation stellaire intense, ou certaines étaient-elles plus calmes, comme la plupart des galaxies actuelles? Certaines des premières galaxies ont-elles eu le temps de former des disques comme la Voie lactée, ou bien les fusions étaient-elles trop fréquentes pour que cela se produise? En trouverons-nous qui ne contiennent que de l'hydrogène et de l'hélium, ou les premières supernovæ les ont-elles enrichies très vite en éléments lourds? À quelle vitesse les premières galaxies ont-elles crû en masse et en nombre? Avec les résultats du relevé *Relics*, nous allons explorer cette période et chercher des réponses à toutes ces questions.

Rappelons d'abord que la lumière se déplace à une vitesse finie. Dès lors, regarder loin revient à observer l'Univers dans le passé. Et plus une source lumineuse est lointaine, moins elle est brillante, ce qui rend sa détection plus difficile. Pour y remédier, les membres du projet *Relics* ont utilisé la technique des

Cette tache rouge et floue dans l'image prise par le télescope spatial *Hubble* correspond à la galaxie SPT0615-JD, l'une des plus lointaines connues à ce jour, présente dans l'Univers âgé de moins de 500 millions d'années.



«lentilles gravitationnelles» pour voir très loin dans le passé. En d'autres termes, nous avons mis à contribution les amas galactiques massifs, qui pour nous sont comme des loupes naturelles. Ces groupes de galaxies ont une masse combinée telle qu'ils courbent de façon importante l'espace-temps, en accord avec les prédictions de la théorie de la relativité générale d'Einstein.

DES LENTILLES POUR MIEUX VOIR

Quand la lumière d'un objet situé au-delà de l'amas de galaxies se propage dans l'Univers, elle suit l'espace-temps courbé autour de l'amas (voir l'encadré ci-dessous). Elle peut alors suivre différentes trajectoires, ce qui a plusieurs conséquences sur l'image que nous percevons de cet objet lointain: il apparaît gauchi et étiré, parfois en plusieurs images et, si les conditions sont optimales, les différents trajets de la lumière convergent au niveau de l'observateur sur Terre et l'intensité de l'image est amplifiée. Si cet effet vous semble abstrait, vous pouvez vous en faire une idée plus concrète avec un effet optique plus classique. Regardez une bougie allumée à travers la base d'un verre à pied, et vous verrez de multiples images grossies de la flamme.

Pour les astronomes du projet *Relics*, l'utilisation des lentilles gravitationnelles a deux intérêts principaux. D'abord, les galaxies grossies

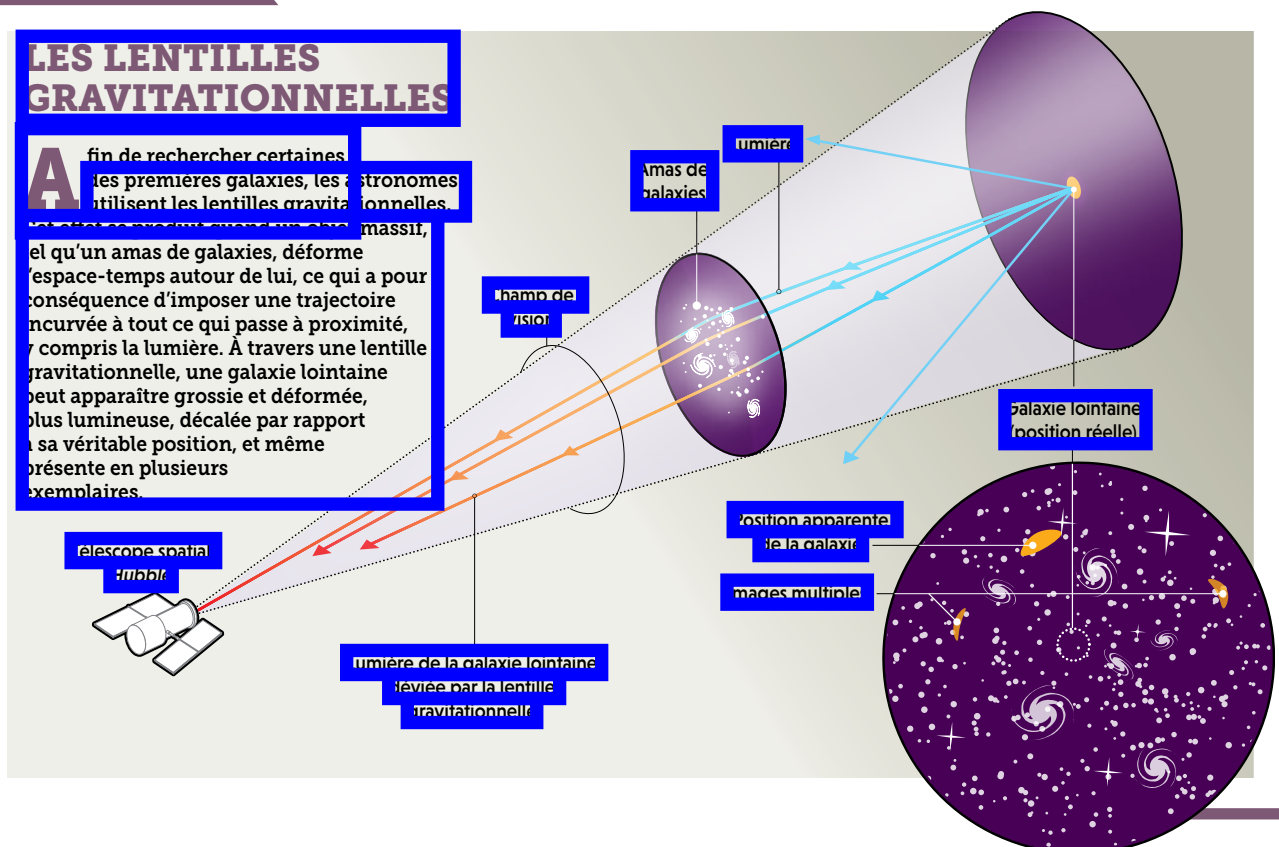
sont plus brillantes et résolues avec davantage de détails que d'ordinaire, ce qui nous permet de mieux étudier leurs propriétés. L'autre point est que les simulations de formation des galaxies (comme Eagle, Illustris, etc.) montrent que les premières galaxies sont très peu brillantes (en plus d'être lointaines), et donc bien au-delà des capacités de détection directe par les télescopes actuels. Il est donc très difficile de révéler ces galaxies par d'autres méthodes, par exemple en observant longtemps des zones «vides», comme dans le cadre des observations de champs profonds par *Hubble*.

Cependant, la technique des lentilles gravitationnelles a une contrepartie importante. Certes, le grossissement nous permet de voir les galaxies moins brillantes, mais, ce faisant, il zoome sur une région plus petite du ciel, qui contient moins de galaxies. La probabilité de voir une galaxie qui nous intéresse diminue, *a priori*. Par chance, l'Univers primordial foisonnait de petites galaxies peu lumineuses, ce qui compense l'effet de zoom: nous détectons beaucoup de galaxies lointaines malgré le champ d'observation restreint.

Trois des plus grands programmes du télescope *Hubble* mis en œuvre ces sept dernières années ont utilisé les lentilles gravitationnelles pour rechercher les galaxies lointaines. Leurs équipes ont, elles aussi, travaillé en tandem avec le télescope *Spitzer*. Ce dernier est

LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Afin de rechercher certaines des premières galaxies, les astronomes utilisent les lentilles gravitationnelles. Elles se produisent quand un objet massif, tel qu'un amas de galaxies, déforme l'espace-temps autour de lui, ce qui a pour conséquence d'imposer une trajectoire incurvée à tout ce qui passe à proximité, y compris la lumière. À travers une lentille gravitationnelle, une galaxie lointaine peut apparaître grossie et déformée, plus lumineuse, décalée par rapport à sa véritable position, et même présente en plusieurs exemplaires.



complémentaire de *Hubble* car il est sensible à des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge. Le premier relevé, *Clash* (*Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble*), était un programme de trois ans dirigé par Marc Postman, de l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore. Ce projet a observé 25 amas galactiques. J'ai participé à l'analyse des images de ce relevé et, en 2012, j'ai découvert MACS0647-JD, une galaxie observée juste 420 millions d'années après le Big Bang. Elle était alors candidate au titre de la galaxie la plus lointaine connue. Elle a été surpassée en 2016, quand Pascal Oesch, de l'université Yale, a découvert une galaxie 20 millions d'années plus ancienne, cette fois avec le relevé *Candels* (*Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey*), une observation par *Hubble* de zones relativement vides du ciel, sans l'aide de lentilles gravitationnelles.

Après les succès du relevé *Clash*, j'ai aidé à convaincre le directeur du télescope *Hubble* de l'époque, Matt Mountain, d'inclure les amas galactiques dans le prochain grand programme d'observation du télescope spatial, nommé *Frontier Fields* et dirigé par Jennifer Lotz, de l'Institut des sciences du télescope spatial. Ce projet suivait les pas des précédents programmes de champs profonds de *Hubble* (tels que *Hubble Deep Field*), qui scrutaient de petites zones du ciel pendant plusieurs jours. Ces premiers projets ciblaient les zones du ciel les plus vides possible, sans lumière brillante de galaxies « proches » (à seulement quelques milliards d'années-lumière de la Terre) qui nous bloquaient la vue sur l'Univers plus lointain.

La première image du champ profond de *Hubble*, qui combinait 342 expositions réalisées sur dix jours en 1995, fut une révélation : dans une minuscule fraction angulaire de ciel vide, pas plus grande qu'un grain de sable tenu à bout de bras, nous avons découvert quelque

3000 galaxies. Par la suite, le *Champ profond de Hubble Sud* et le *Champ ultra-profond* ont pris le même soin d'éviter les régions comportant des galaxies proches.

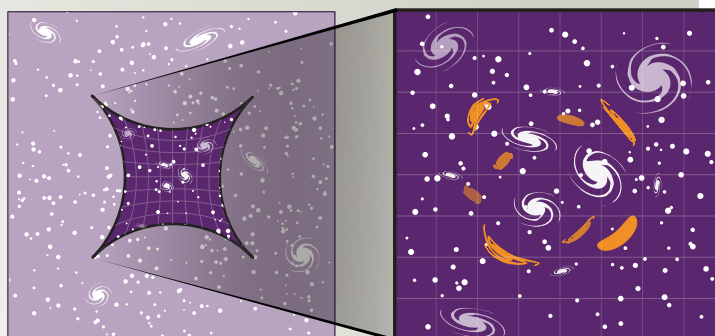
Le projet *Frontier Fields* a observé six régions relativement vides, s'inscrivant dans la continuité des précédents programmes de champs profonds. Mais il a aussi rompu avec cette approche en obtenant des images profondes de six régions contenant certaines des plus fortes concentrations de galaxies distantes de 3 à 5 milliards d'années-lumière, afin de profiter d'effets de lentilles gravitationnelles. En amplifiant la puissance de détection de *Hubble* et de *Spitzer* avec les lentilles gravitationnelles, les champs de *Frontier Fields* ont révélé les galaxies les plus petites et les plus lointaines jamais observées.

SCRUTER DES AMAS GALACTIQUES

Après *Clash*, et avec *Frontier Fields* en cours, il n'était pas évident que les astronomes approuveraient une nouvelle demande de temps d'observation sur le télescope *Hubble* afin de scruter des amas galactiques. Mais j'avais remarqué que de nombreux amas massifs, récemment découverts, n'avaient jamais été observés par *Hubble* dans l'infrarouge proche, une plage de longueurs d'onde intéressante pour chercher les galaxies lointaines. En effet, à cause de l'expansion de l'Univers, la longueur d'onde de la lumière des objets lointains subit un étirement et augmente : c'est l'effet de *redshift* ou décalage vers le rouge. Or les étoiles de galaxies jeunes émettraient beaucoup dans l'ultraviolet, un rayonnement qui arriverait jusqu'à nous dans l'infrarouge proche. Ces amas de galaxies constituaient donc de potentielles lentilles que nous n'avions pas encore exploitées pour traquer des galaxies dans l'Univers âgé de moins d'un milliard d'années.

DEUX STRATEGIES

Les astronomes adoptent deux approches différentes pour rechercher des galaxies lointaines. La première consiste à observer en temps une zone apparemment vide du ciel, de façon à collecter de la lumière d'objets peu lumineux. Une autre option est de scruter des zones comportant un amas galactique massif qui joue le rôle de lentille gravitationnelle, ce qui amplifie la lumière venant d'un éventuel objet lointain situé en arrière-plan. Si l'on compare ces deux méthodes, le champ de vision est plus petit dans le cas de la lentille, du fait de l'effet de zoom ; et l'image est déformée. Néanmoins, cette technique est plus efficace pour traquer les premières galaxies.



one du ciel comportant un amas galactique massif

galaxies lointaines apparaissant grâce à l'effet de lentille gravitationnelle

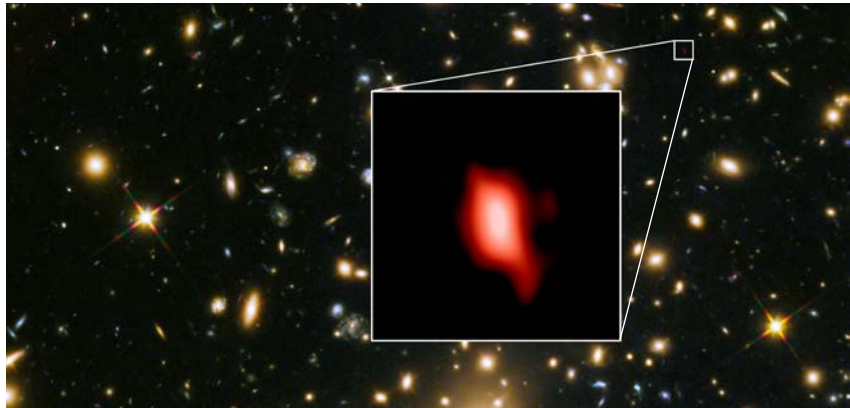
LES PREMIÈRES GALAXIES VERS 200 MILLIONS D'ANNÉES APRÈS LE BIG BANG

Déterminer à quelle époque les premières galaxies se sont formées est un des défis de l'astronomie moderne. Pour y parvenir, les chercheurs suivent deux stratégies. L'une consiste à simuler l'histoire de l'Univers au moyen d'ordinateurs très puissants, l'autre est de tenter de repousser toujours plus loin les frontières de l'Univers observable, grâce aux grands télescopes.

D'après les simulations numériques décrivant la formation des galaxies et des grandes structures dans l'Univers primordial, les galaxies se seraient formées au sein de grands nuages (ou halos) de matière noire assez massifs (d'environ 10^{12} fois la masse du Soleil) où des étoiles seraient nées à un rythme élevé. Or, du fait de la croissance progressive des halos, ces derniers n'ont atteint la taille nécessaire qu'à partir de 200 millions d'années après le Big Bang.

A partir de ce moment, les premières étoiles auraient émis surtout de la lumière ultraviolette. Mais, du fait de l'expansion de l'Univers, ce rayonnement a subi un décalage vers des longueurs d'onde plus grandes et nous parvient sur Terre dans l'infrarouge proche. Or, actuellement, aucun instrument, au sol ou dans l'espace, ne permet d'étudier avec une bonne résolution ce domaine de longueurs d'onde. Il est donc difficile de confirmer quand les toutes premières galaxies se sont formées.

Les galaxies les plus lointaines connues à ce jour (UDFj-39546284 et GN-z11) ont été repérées avec le télescope spatial *Hubble* à une longueur d'onde



Grâce à l'amplification de la lumière par une lentille gravitationnelle, l'observatoire *Alma* a observé le contenu en oxygène (en rouge, dans le zoom) de la galaxie lointaine MACSJ1149-JD1.

de 1,6 micromètre, ce qui correspondrait à une lumière émise environ 400 millions d'années après le Big Bang. Elles sont donc un peu plus anciennes que la galaxie SPT0615-ID évoquée par Dan Coe.

S'il est impossible, pour l'instant, d'observer directement la naissance des premières galaxies, on peut estimer la période à laquelle elles se sont formées. Pour ce faire, on détermine l'âge de l'Univers où l'on observe une galaxie lointaine, grâce au décalage vers le rouge de la lumière, puis on estime l'âge des plus vieilles étoiles qu'elle contient. Les étoiles âgées émettent surtout de la lumière dans le domaine optique, qui

En analysant la lumière émise par les étoiles vieilles, nous avons estimé quand la galaxie est née

ne nous parvient dans l'infrarouge, du fait de l'expansion de l'Univers. Or l'atmosphère terrestre est opaque au rayonnement infrarouge, il est donc nécessaire d'aller dans l'espace. L'observatoire spatial *Spitzer* est le télescope le plus performant, à ce jour, pour étudier le rayonnement infrarouge. Cependant, sa sensibilité limite la détection aux galaxies les plus brillantes. Ainsi, cette technique ne s'applique qu'aux galaxies les plus massives ou à celles dont la lumière a été fortement amplifiée par l'effet de lentille gravitationnelle.

Grâce à cette approche, nous avons récemment découvert l'une des galaxies les plus lointaines connues à ce jour, MACSJ1149-JD1, que nous observons telle qu'elle était quand l'Univers était âgé de 550 millions d'années (près de 4% de son âge actuel). Cette galaxie repérée sur les images du télescope spatial *Hubble* comporte 1000 fois moins d'étoiles que la Voie lactée. Elle est cependant dix fois plus brillante qu'elle n'est réellement, en raison de la présence de l'amas de galaxies MACSJ1149+2223 le long de la ligne de visée, qui agit comme une lentille gravitationnelle. Grâce, avec le VLT et *Alma*, à la mesure précise du décalage spectral de cette galaxie, et à celle de la quantité de lumière reçue en infrarouge, mes collègues et moi avons estimé quand la galaxie est née. Nous avons estimé que la formation de la galaxie remonte à environ 260 millions d'années après le Big Bang.

L'étude de MACSJ1149-JD1 constitue la première preuve observationnelle de l'existence des galaxies à une époque en accord avec celle prédite grâce aux simulations numériques.

Le futur télescope spatial *James-Webb Space Telescope*, qui sera lancé en mars 2021, repoussera les limites de nos observations. Grâce à la haute sensibilité des détecteurs infrarouges du télescope et la grande taille de son miroir (6,5 mètres de diamètre), nous mesurerons l'âge de galaxies encore plus lointaines et repérerons ces galaxies quelques millions d'années seulement après leur formation.

NICOLAS LAPORTE

University College, Londres, Royaume-Uni

J'avais trouvé ces amas dans un catalogue constitué en 2015 par les chercheurs travaillant sur les données de l'observatoire spatial *Planck*, de l'Agence spatiale européenne. Le projet *Planck* est surtout connu pour ses cartes globales et détaillées du fond diffus cosmologique, le premier rayonnement émis dans l'Univers, alors âgé de seulement 380 000 ans. Mais les données de *Planck* ont aussi contribué à établir un catalogue de plus de 1 000 amas galactiques massifs, révélés par les distorsions qu'ils provoquaient dans les cartes du fond diffus.

UN PROGRAMME AMBITIEUX

La plupart de ces amas étaient déjà connus, mais beaucoup ont aussi été découverts par ce biais. Je me suis ainsi aperçu que l'amas le plus massif du catalogue, Abell 2163, n'avait été observé par *Hubble* qu'en longueurs d'onde visibles, et pas dans l'infrarouge proche. Le deuxième amas le plus massif (PLCK G287.0+32.9, découvert par *Planck*) constituait une excellente lentille gravitationnelle, mais *Hubble* n'avait pas encore tourné son regard vers lui.

J'ai ainsi dressé une liste de 41 amas massifs qui n'avaient pas été observés dans l'infrarouge proche, et, avec des collègues, nous avons rédigé une proposition d'observation. Nous avons demandé à utiliser *Hubble* sur l'équivalent de 5% de son temps réservé aux projets de cette année-là, ce qui correspondait à plus de 100 heures d'observation. Mais notre proposition était loin d'être la seule à avoir été soumise, et la compétition était rude. Des astronomes du monde entier se sont réunis à Baltimore pour décider des projets à retenir. En juin 2015, notre demande a été acceptée, un des plus gros programmes d'observation des 23 années d'exploitation de *Hubble*.

Le relevé *Relics* a observé chacun des 41 amas avec le détecteur infrarouge de la caméra WFC3/IR (Wide Field Camera 3). Nous les avons aussi observés dans le visible (si cela n'avait pas déjà été fait) à l'aide de la caméra ACS (Advanced Camera for Surveys). Les images à plus haute résolution de l'ACS nous ont aidés à mesurer les propriétés de la lentille gravitationnelle de chaque amas et à estimer le grossissement des lointaines galaxies découvertes dans les images de WFC3/IR. Nous avons observé à sept longueurs d'onde différentes comprises entre 400 et 1 700 nanomètres. En examinant des caractéristiques connues de la lumière, comme la longueur d'onde précise qu'absorbe l'hydrogène neutre (dans lequel baignent les galaxies de l'Univers jeune), nous sommes en mesure d'estimer de combien la lumière de la galaxie a été décalée vers le rouge, et donc d'estimer l'éloignement de la galaxie.

On nous a également alloué 945 heures de temps de télescope sur *Spitzer*. Ses données

dans l'infrarouge fournissent un recensement plus complet des étoiles dans les premières galaxies, nous permettant de mesurer leur masse stellaire et aussi de confirmer les estimations de distance obtenues grâce à *Hubble*.

En 2017, Brett Salmon a découvert la galaxie SPT0615-JD dans les données du relevé *Relics*, une galaxie particulièrement rouge. Le caractère unique de cette galaxie n'était pas évident au premier coup d'œil. En effet, les galaxies peuvent paraître rouges pour diverses raisons. Certaines ont un fort décalage vers le rouge car elles sont très lointaines. Mais d'autres sont enveloppées de nuages de poussière, qui absorbent la lumière bleue et la réémettent sous la forme de rayon-

La galaxie SPT0615-JD date de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années

nement infrarouge, ce qui fait paraître les galaxies plus rouges qu'elles ne le sont vraiment. Et d'autres galaxies n'ont pas formé beaucoup de nouvelles étoiles, et les astres qui y restent sont des étoiles rouges de longévité importante. Les galaxies rouges peuvent aussi être une combinaison de tout cela: décalées vers le rouge, poussiéreuses et vieilles.

Les observations du télescope *Spitzer* entre 3 et 5 micromètres de longueur d'onde sont très utiles pour nous aider à distinguer les galaxies lointaines décalées vers le rouge des galaxies intrinsèquement rouges, qui apparaîtraient encore plus brillantes dans les données de *Spitzer*. Nous avons initialement découvert trois galaxies (dont SPT0615-JD) dans les images de *Hubble* qui semblaient avoir un décalage vers le rouge (noté z) d'environ 10, datant de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années, soit il y a plus de 13 milliards d'années. Mais l'analyse des observations de *Spitzer* a révélé que deux d'entre elles avaient plutôt un décalage vers le rouge d'environ 2, correspondant à l'époque où l'Univers avait déjà 3 milliards d'années (presque un quart de son âge actuel). La galaxie SPT0615-JD a survécu à l'analyse de *Spitzer*, et est restée un candidat probable à $z=10$.

Ce résultat a été obtenu en combinant l'analyse sur les données de *Hubble* de Brett Salmon

LE DECALAGE VERS LE ROUGE OU REDSHIFT

Lorsqu'une source s'éloigne de l'observateur parce qu'elle se déplace ou parce que l'Univers est en expansion), les longueurs d'onde de sa lumière sont augmentées, et ainsi décalées vers le rouge. Si λ_0 est la longueur d'onde émise par la source, et λ_{obs} celle mesurée par un télescope, on définit le redshift :

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Dans le cas de l'expansion de l'Univers, le redshift est relié aux distances dans le cosmos.

et une analyse sur celle de *Spitzer* par Victoria Strait, de l'université de Californie à Davis. Nous avons trouvé que le spectre lumineux de SPT0615-JD diminue à partir de 1,34 micromètre, et aucune lumière de longueur d'onde inférieure n'a été détectée en provenance de cette source. Cette part manquante du spectre s'explique par le fait que les atomes d'hydrogène du gaz dans l'Univers primordial ont absorbé cette lumière et se sont ionisés en perdant leur électron. La rupture brutale dans le spectre de SPT0615-JD nous permet de mesurer la distance de l'objet. Bien que nous observions ce décrochement autour de 1,34 micromètre, nous savons que l'hydrogène neutre s'ionise en absorbant de la lumière de longueur d'onde inférieure à 0,1216 micromètre. La différence provient du décalage vers le rouge lié à l'expansion de l'Univers. Nous observons SPT0615-JD à un décalage vers le rouge de 10, c'est-à-dire quand l'Univers n'avait que 3,5% de son âge actuel.

Cette datation fait de SPT0615-JD l'une des plus anciennes galaxies que nous connaissons.

On connaît deux autres galaxies légèrement plus lointaines, observées quand l'Univers avait 400 millions d'années (voir l'encadré page 65). Mais dans les images de *Hubble*, ces galaxies sont de simples points infrarouges, trop petits pour discerner le moindre détail de leur structure interne. La galaxie SPT0615-JD est spéciale: sa lumière a été étirée et amplifiée par un effet de lentille gravitationnelle, ce qui nous offre l'aperçu le plus détaillé à ce jour d'une galaxie aussi ancienne.

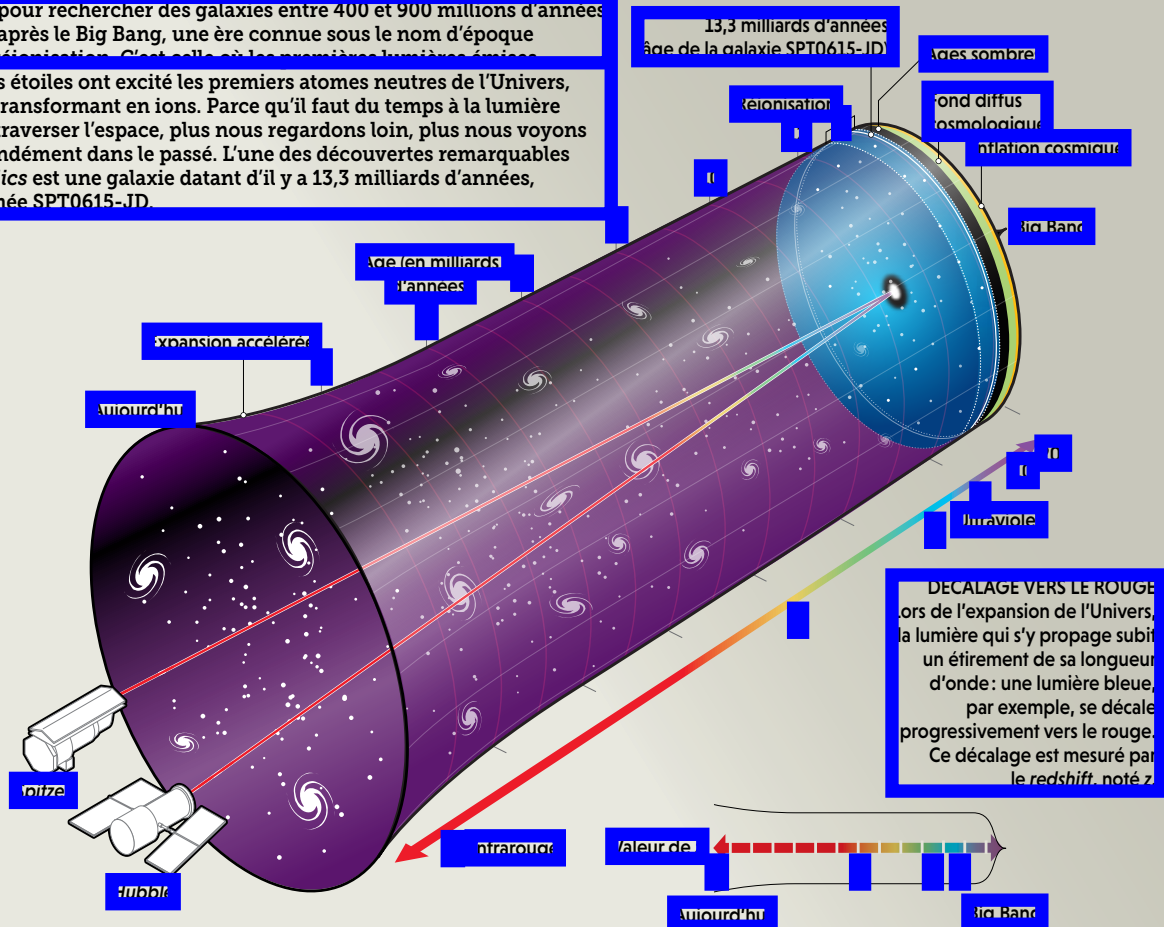
Les observations de cette galaxie sont loin d'être terminées. D'après Rachel Paterno-Mahler, de l'université de Californie à Irvine, nous devrions voir des images multiples (bien que très pâles) produites par l'effet de lentille gravitationnelle, ce qui n'a pas encore été le cas.

Nous avons aussi un programme d'observation de cette galaxie avec *Alma* (*Atacama Large Millimeter Array*, grand réseau d'antennes millimétriques de l'Atacama), dont nous attendons qu'il confirme notre mesure de la distance et qu'il y observe la présence d'oxygène, ce qui

CHRONOLOGIE COSMIQUE

Le relevé *Relics* a utilisé les télescopes spatiaux *Hubble* et *Spitzer* pour rechercher des galaxies entre 400 et 900 millions d'années après le Big Bang, une ère connue sous le nom d'époque de la réionisation. C'est celle où les premières lumières émises

par les étoiles ont excité les premiers atomes neutres de l'Univers, les retransformant en ions. Parce qu'il faut du temps à la lumière pour traverser l'espace, plus nous regardons loin, plus nous voyons profondément dans le passé. L'une des découvertes remarquables de *Relics* est une galaxie datant d'il y a 13,3 milliards d'années, nommée SPT0615-JD.



constituerait la détection la plus ancienne d'un élément aussi lourd. Et nous allons proposer les observations avec le prochain observatoire redouté de la Nasa, le *JWST* (*James-Webb Space Telescope*). Nous espérons alors obtenir des images détaillées de la dynamique interne de la galaxie, mesurer sa contribution à la réionisation et déterminer sa composition chimique, à savoir s'il s'agit uniquement d'hydrogène et d'hélium ou si la galaxie est déjà enrichie en éléments plus lourds.

La galaxie SPT0615-JD a été la découverte la plus remarquable de *Relics*, mais nous avons trouvé près de 300 autres galaxies dans le premier milliard d'années de l'Univers, dont l'ancienneté reste à confirmer. Parmi elles se trouvent les galaxies les plus brillantes datant de ces temps anciens, ce qui nous permettra de les étudier en détail.

LE CHAPITRE MANQUANT DE L'HISTOIRE COSMIQUE

Les galaxies anciennes que nous trouvons grâce à *Relics* nous aident à remplir une des pages blanches du grand livre de l'histoire du cosmos. Dans le cadre du modèle standard cosmologique, l'Univers a débuté par un Big Bang suivi aussitôt d'une période d'inflation durant laquelle l'espace a gonflé à grande vitesse. Environ 380 000 ans après sa naissance, l'Univers s'est assez refroidi pour que les premiers atomes se forment et que la lumière se propage librement. Nous voyons aujourd'hui les traces de cet épisode avec le fond diffus cosmologique.

Mais après, l'histoire de l'Univers souffre d'un trou de près de 400 millions d'années. Nous n'avons jamais observé le moindre objet correspondant à cette période. Ces 3% de l'histoire cosmique nous sont inconnus. Mais nous savons qu'il s'y est passé beaucoup de choses. Les premières étoiles se sont formées peut-être 100 millions d'années après le Big Bang. Ensuite, nous pensons que les étoiles ont commencé à s'agglutiner et à former *in fine* les premières galaxies. La lumière de ces galaxies a commencé à bombarder les atomes d'hydrogène environnant, les ionisant et libérant leurs électrons.

Comprendre comment ce processus s'est déroulé en étudiant ces galaxies est crucial pour remplir les pages manquantes de l'histoire de nos origines. Le relevé *Relics* et les projets qui l'ont précédé (comme *Clash*, *Candels* et *Frontier Fields*) avancent à grands pas, mais nous attendons un véritable bond en avant avec le *JWST*, qui prendra son envol en 2021. Cet observatoire spatial sera l'outil le plus puissant de l'humanité pour sonder les temps les plus reculés. Équipé d'un plus grand miroir, sensible à des longueurs d'onde plus importantes que les télescopes précédents, il verra des galaxies plus lointaines et moins

brillantes avec une meilleure résolution. Et il sera capable de déterminer la masse et la composition de ces galaxies, ainsi que leur contribution à la réionisation.

Les lentilles gravitationnelles nous ont été d'une aide précieuse pour découvrir des galaxies lointaines avec les télescopes existants, et je ne doute pas que cette stratégie, combinée à la puissance du *JWST*, poussera les découvertes encore plus loin, jusqu'à des décalages vers le rouge encore plus grands.

Les premières étoiles se seraient formées 100 millions d'années après le Big Bang

Plus nous regardons loin dans le passé, plus nous constatons que les petites galaxies y représentent une part importante du total. Si cette tendance se poursuit dans les 400 premiers millions d'années, l'avantage que confèrent les lentilles gravitationnelles n'en sera que multiplié. Sur la base des estimations actuelles, je pense que les lentilles seront la clé de la découverte des toutes premières galaxies avec le *JWST*.

Ce télescope spatial verra sûrement des galaxies à 300 millions d'années après le Big Bang, et, avec les lentilles gravitationnelles, nous espérons voir des galaxies dans l'Univers âgé de moins de 200 millions d'années – si tant est que des galaxies se formaient déjà à une époque aussi reculée.

L'inconvénient du *JWST* est sa durée de vie, entre 5 et 10 ans, qui est relativement courte comparée aux 28 ans de *Hubble*. Le *JWST* aura assez de carburant pour maintenir son orbite pendant une décennie. Et il évoluera à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, soit beaucoup trop loin pour que des astronautes puissent assurer son ravitaillement et son entretien, comme cela a été le cas plusieurs fois avec *Hubble*. Nous devons donc être opérationnels très vite pour traquer les anciennes galaxies. Le relevé *Relics* nous permettra d'optimiser la brève existence du *JWST*, parce qu'il a déjà identifié certaines des galaxies anciennes les plus intéressantes à observer en détail avec ce nouveau télescope, ainsi que les régions du ciel comportant de fortes lentilles, où le *JWST* ne manquera pas de trouver de nouvelles galaxies. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. Hashimoto et al.,
The onset of star formation 250 million years after the Big Bang,
Nature, vol. 557, pp. 392-395, 2018.

S. Salmon et al.,
RELICS : a candidate z~10 galaxy strongly lensed into a spatially resolved arc, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 864(1), article L22, 2018.

M. Lemonick,
La fin de l'âge sombre,
Pour la Science n° 441, juillet 2014.

Qu'a fait découvrir la mission américano-européenne *Cassini-Huygens*, qui a exploré Saturne et ses satellites de 2004 à 2017 ? En quoi consiste la mission européenne *Juice*, qui sera lancée en 2022 pour atteindre Jupiter et ses satellites en 2030 ? Suivez l'actualité de la recherche spatiale présentée par ceux qui la font, à travers cette séance de l'Académie de l'air et de l'espace.

Avec

Avec Jean-Pierre Lebreton, responsable mission *Huygens* à l'Esa, et Olivier Witaske, chef du projet *Juice* à l'Esa.

REMERCIEMENTS



REMERCIEMENTS

POUR LA
SCIENCE

Palais

DÉCOUVERTE

explorer les géantes gazeuses

conférences accès gratuit

jeudi 7 février
— 14h

© Agf. Oc. S Rankin - Fotostock

cité

sciences
et industrie

piloter un objet par l'activité cérébrale

conférences accès gratuit

mercredi 13 février
— 18h

Imaginer le mouvement pour le faire réaliser par un avatar technique, c'est l'un des défis des interfaces cerveau-machine. Les applications cliniques seront importantes, notamment pour la mobilité des personnes tétraplégiques. Des questions éthiques se posent aussi.

Avec

Alain Berthoz, Collège de France, Guillaume Charvet, CEA, Anatole Lécuyer, INRIA, Fabien Lotte, INRIA, Jérémie Mattout, INSERM.

REMERCIEMENTS

ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES

REMERCIEMENTS

POUR LA
SCIENCE

L'ESSENTIEL

• Certaines espèces, telles que des pissenlits, les escargots et des poissons, s'adaptent de façon surprenante aux contraintes des milieux urbains.

• Leur évolution est souvent plus rapide qu'elle ne le serait dans d'autres types d'écosystèmes.

• Comme les pressions de sélection sont similaires d'une ville à l'autre, certaines espèces pourraient devenir de plus en plus semblables d'un bout à l'autre de la planète.

• En revanche, beaucoup d'espèces ne pourront jamais s'adapter aux milieux urbains et nécessitent une protection.

L'AUTEUR



MENNO SCHILTHUIS
spécialiste de biologie de l'évolution, professeur à l'université de Leyde et chercheur au centre de biodiversité Naturalis, aux Pays-Bas

Pissenlit des villes, pissenlit des champs

Bonne nouvelle : certaines espèces d'animaux et de plantes s'adaptent à l'environnement urbain, souvent avec une étonnante rapidité.
Mauvaise nouvelle : l'urbanisation galopante risque aussi de conduire à l'extinction un grand nombre d'espèces.

«**F**ou!» s'exclame mon ami Franck en lançant ses mains droit vers le ciel, manquant de renverser son verre. Nous sommes assis dans mon jardin à Leyde, aux Pays-Bas. Franck me mime avec entrain le faucon pèlerin qui, chaque jour, ne a vive autre devant la fenêtre de son bureau à l'hôpital pour rejoindre son perchoir en haut du bâtiment, un pigeon fraîchement tué entre ses serres.

Les faucons pèlerins font partie de ces nombreux oiseaux qui ont récemment adopté un mode de vie urbain. Chassant d'habitude les oiseaux de taille moyenne aux abords des falaises, ils ont troqué peu à peu leurs escarpements rocheux pour des clochers d'église, cheminées et gratte-ciel, et les geais pour des pigeons. Dans certaines régions d'Europe et d'Amérique du Nord, la plupart des faucons pèlerins nichent dans les villes.

Ces ressemblances fortuites entre environnements naturels et milieux urbains attirent certaines espèces animales et végétales dans les métropoles. Les blattes se sont aisément accommodées à nos demeures sombres et humides. Les abords des routes salées en hiver conviennent parfaitement aux plantes de bords de mer. Les rats laveurs, avec leurs petites pattes avant aussi agiles que des mains, manipulent avec adresse les poubelles qui parsèment les trottoirs.

Homo sapiens a établi d'immenses lieux de vie sur presque tous les continents. En 2030, plus de 600 villes accueilleront plus de un million d'habitants. Les humains constituent la première espèce à avoir produit des conditions de vie pour un nombre aussi élevé d'autres espèces, et ce à une échelle aussi vaste. Mais quelque chose de plus surprenant encore est en train de se dérouler sous nos yeux. La ville, avec ses immeubles de briques, de verre et d'acier, ses artères où circulent des milliers de





Des araignées nocturnes vivent sous les ponts. Bien qu'elles évitent la lumière du jour, elles tissent désormais leurs toiles sous les lampes qui attirent les insectes. Les graines des pissenlits urbains sont plus lourdes que celles des pissenlits de la campagne. Elles ont ainsi plus de chances de tomber droit au sol, là où il y a de la terre.



véhicules, les produits chimiques qui émanent de ses pores et sa lumière artificielle, est un environnement à la fois riche et extrême. Si les conditions de vie y sont ardues, l'espace urbain offre aussi beaucoup de nourriture et de ressources. Comme dans les milieux naturels tels que les déserts, les sources hydrothermales et les grottes profondes, la combinaison de dangers et d'occasions favorables influe sur l'histoire évolutive des animaux et des plantes qui s'y aventurent. C'est ce que nombre de mes collègues et moi sommes en train de découvrir : les villes sont devenues des chaudrons d'évolution, des lieux qui forcent les espèces à s'adapter rapidement et partout.

DES ESCARGOTS DONT LA COQUILLE DEVIENT PLUS CLAIRE

Quelques minutes de marche depuis le pas de ma porte suffisent à faire prendre conscience de l'évolution des espèces en ville. Ma petite cour arrière est un bon exemple. En tant que biologiste, je dois admettre que mon jardin est une source d'embarras (comme Frank ne cesse de me le rappeler). Toutes sortes de mauvaises herbes poussent entre les vieux pavés du sol. Dans un coin, trône un pot d'hortensias. Dans un autre, un vieux rosier se laisse oublier, à quelques pas des plants de houblon qui grimpent obstinément et dans tous les sens le long du mur.

Derrière le houblon se cache l'un de mes exemples favoris d'évolution en ville. J'écarte délicatement quelques feuilles afin de montrer à Frank les escargots qui grignotent les branches mortes des années précédentes. Ces mollusques, de l'espèce européenne *Cepea nemoralis*, ont des coquilles aux couleurs et motifs

variés. Ces variations sont codées au sein de leur ADN. Les coquilles des escargots de mon jardin sont jaune pâle et ornées de bandes noires spirales, alors que ceux que l'on trouve à la campagne sont plus souvent rouges ou marron.

Ce sont les îlots de chaleur urbains qui sont responsables de cette teinte plus claire. Les villes ont en effet tendance à être plus chaudes que les campagnes alentour, car les bâtiments et les rues absorbent la chaleur du soleil. Cette absorption, qui s'ajoute à la chaleur produite par les activités de millions de personnes et leurs machines, crée une bulle d'air chaud. Dans une cité modeste telle que Leyde, l'air dans le centre est en moyenne deux ou trois degrés plus chaud que dans les environs. Mais dans des villes comme New York, Paris ou Tokyo, la différence peut dépasser dix degrés. Pour les escargots, qui sont parfois forcés de passer des semaines accrochés au mur en pleine sécheresse estivale, l'excès de chaleur

Les villes sont devenues des lieux qui forcent les espèces à s'adapter rapidement

peut être fatal. D'autant plus s'ils ont une coquille sombre, qui absorbe l'énergie. En ville, la sélection naturelle favorise donc les escargots aux coquilles plus claires.

Alors que Franck et moi sortons de mon jardin et pénétrons dans l'allée, nous posons le pied sur un deuxième exemple d'adaptation urbaine, qui pousse à travers les fractures du bitume: les pissenlits. Certains ont des fleurs d'un jaune éclatant, tandis que d'autres arborent une ombrelle de graines duveteuses. En conditions naturelles, les graines, suspendues à leur parachute plumeux, s'envolent au gré des vents et finissent par atterrir et germer loin de leurs parents et de leurs frères et sœurs. Cela diminue la compétition pour les ressources. Mais en ville, les chances que cette stratégie soit un succès sont aussi réduites que les surfaces de terre disponibles: les quelques centimètres carrés où la plante mère parvient à pousser sont souvent les seuls sites de sol fertile à la ronde. Les graines qui se laissent porter par le vent ont alors toutes les chances d'atterrir sur du béton.

DES GRAINES QUI TOMBENT À PROXIMITÉ DE LA PLANTE MÈRE

Dans ces conditions, être doté de graines plus lourdes, qui tombent directement au sol, au pied de la plante mère, est la stratégie gagnante. C'est ce qu'a découvert en 2012 Arathi Seshadri, de l'université d'État du Colorado. Ces résultats montrent que les graines des pissenlits urbains sont plus allongées et tombent deux fois plus vite que celles des pissenlits des champs.

C'est aussi ce qu'avait découvert en 2008 l'équipe de Pierre-Olivier Chentou, du Centre

es pigeons, peu inquiètes par la présence de l'auteur, doivent apprendre à se cacher des faucons pèlerins qui sont de plus en plus nombreux en milieu urbain. Les escargots qui vivent sur les murs des villes ont des coquilles qui s'éclaircissent au fil des générations. Il s'agit d'une adaptation à la chaleur urbaine, car ces coquilles absorbent moins de chaleur.

l'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier, sur une fleur proche du pissenlit, le crépis de Nîmes (*Crepis sancta*), qui produit à la fois des graines qui se dispersent et des graines qui ne se dispersent pas. Leurs résultats montrent que le pourcentage de graines qui ne s'envolent pas au loin et tombent directement au sol est beaucoup plus important dans les milieux urbains que dans les autres milieux. En outre, cette évolution apparaît en seulement cinq à douze générations.

Paradoxalement, cette adaptation ressemble à celle que l'on retrouve chez les porcelles enracinées (*Hypochaeris radicata*), une cousine du pissenlit, également de la famille des astéracées. La différence, c'est que la porcelle a développé cette caractéristique loin de la ville. Sur de minuscules îlots à l'ouest des côtes canadiennes, les graines de ces fleurs tombent deux fois plus vite que celles du continent. Chez cette espèce, c'est le risque de se retrouver en mer qui a été le moteur des modifications.

DES ARAIGNÉES NOCTURNES QUI PROFITENT DE LA LUMIÈRE ARTIFICIELLE

Alors que nous poursuivons notre promenade, Frank et moi émergeons de l'allée et traversons la rue principale qui mène à la rivière Gailgewater. Une grappe de maisons péniches ceinture le quai où Rembrandt a vu le jour il y a plus de quatre siècles. Contre les fenêtres des péniches et entre les barreaux de la rambarde du pont qui enjambe la rivière, des toiles d'araignée scintillent au soleil. En nous approchant de quelques pas, se dévoile à nos yeux l'étendue du massacre: des dizaines de cadavres de



moucheron et de papillons sont pris au piège des fils de soie.

Les araignées *Larinioides sclopetarius* qui ont tissé ces toiles ne sont quant à elles visibles nulle part. Nocturnes, elles se dissimulent dans les crevasses à l'abri de la lumière du jour, et attendent la tombée de la nuit pour venir guetter leurs proies. Pourtant, ces toiles sont construites juste sous les lumières du pont. Cette araignée citadine a abandonné ses vieilles habitudes afin de profiter de l'attrait de la lumière sur les insectes. Dans les années 1990, l'arachnologue autrichienne Astrid Heiling a montré qu'en ville, les araignées qui vivent sur les ponts tolèrent très bien la lumière artificielle, alors même qu'elles continuent d'éviter la lumière du soleil.

DES PAPILLONS DE NUIT QUI NE SONT PLUS ATTIRÉS PAR LES LUMIÈRES

Curieusement, au moins l'une des espèces faisant partie des proies de l'araignée emprunte un chemin évolutif inverse. Pour les insectes, l'attrait irrésistible des ampoules lumineuses est souvent fatal. Quand ils ne finissent pas grillés sous l'effet de la chaleur, ils s'épuisent à voler sans arrêt autour de la source de lumière alors qu'ils devraient se nourrir ou s'accoupler, ou trépassent entre les mâchoires d'une araignée. Beaucoup d'entomologistes pensent que, malgré le lourd tribut, l'attraction de la lumière est tellement

ancrée dans le cerveau de ces insectes qu'ils ne peuvent y résister.

Peu convaincu, l'entomologiste suisse Florian Altermatt s'est penché sur le cas d'un papillon de nuit de la famille des yponomeutidés (*Yponomeuta cagnagella*). Il a ainsi collecté des centaines de chenilles dans le centre-ville éclairé de Bâle et dans les forêts sombres à l'extérieur de la ville. De retour dans son laboratoire, il a marqué chaque individu d'une couleur indiquant son origine, citadine ou forestière. Plus de 1 000 individus ont ensuite été relâchés dans une grande cage sombre, pourvue d'un seul tube fluorescent à une extrémité. Sans surprise, les papillons ruraux avaient tendance à voltiger autour de la lampe. Mais ceux de la ville étaient plus nombreux à ignorer la lumière et à s'installer ailleurs dans la cage. Selon les conclusions du chercheur, une résistance à l'attrait de la lumière artificielle est apparue avec le temps chez ces papillons urbains.

La poignée d'exemples d'évolution en contexte urbain que Frank et moi avons rencontrés pendant notre bref tour dans les rues de la ville est représentative du processus qui se déroule dans tous les écosystèmes urbains de la planète. En plus des îlots de chaleur, de l'imperméabilité des sols et de la pollution lumineuse, la faune et la flore des villes doivent surmonter une panoplie d'autres défis tels que le bruit, la pollution chimique et le trafic. Les biologistes de l'évolution en milieu urbain ont

DES CHANTS PLUS SEDUISANTS

Une étude menée dans la région de la mer du Nord par Wouter Halfwerk, de l'université libre d'Amsterdam, et ses collègues a tout récemment montré que les grenouilles mâles de l'espèce *Engystomops pustulosus* (ci-contre) vivant en milieu urbain ont des chants nuptiaux plus fréquents et plus complexes que les mâles vivant en forêt - et que, de ce fait, ils attirent davantage les femelles. Ces différences semblent dues au fait que les grenouilles urbaines sont confrontées à une plus forte

compétition dans la quête d'un partenaire sexuel, mais à une moindre pression exercée par les prédateurs et parasites.

Un plus est le transfert d'individus d'un milieu à l'autre a montré que les mâles urbains peuvent adapter rapidement leurs chants à la présence accrue de prédateurs et de parasites. En revanche, placés en milieu urbain, les mâles forestiers n'ajustent pas leurs chants. Les grenouilles des villes, plus débrouillardes que les grenouilles des forêts ?



découvert de nombreux exemples d'espèces qui se sont adaptées à de tels facteurs de stress.

Certains organismes ont même supporté ce que l'on pensait insupportable. L'équipe d'Andrew Whitehead, de l'université de Californie à Davis, a en effet montré que les choquemorts, des petits poissons d'estuaire de la côte est des États-Unis, ont développé une tolérance à des concentrations de PCB jusqu'à 8000 fois plus élevées que la concentration normalement létale.

Outre les facteurs physiques et chimiques, les facteurs biologiques jouent aussi un rôle majeur. En ville, une multitude d'espèces de toutes sortes se côtoient. Parmi elles se trouvent des espèces étrangères, introduites accidentellement ou intentionnellement: les plantes ornementales, les cultures agricoles et insectes nuisibles, les animaux domestiques ainsi que tous les insectes et mauvaises herbes que les individus transportent sur leurs vêtements ou dans leurs véhicules. Ces organismes forment un ensemble d'espèces qui cohabitent bon gré mal gré, sans avoir eu vraiment l'occasion de s'adapter les unes aux autres.

Ce mélange peu orthodoxe ouvre la porte à l'apparition de nouvelles stratégies d'attaque et de défense et à des phénomènes de coévolution. De nouvelles aptitudes pour se nourrir à partir de graines natives des villes pourraient apparaître avec le temps chez les perruches exotiques, tandis que les oiseaux urbains développeraient des défenses immunitaires contre les parasites venus d'ailleurs.

Tout cela crée un mélange explosif au sein duquel les espèces urbaines évoluent rapidement. Des adaptations majeures apparaissent parfois en quelques décennies, voire en quelques années seulement. La tolérance au PCB chez les choquemorts est survenue en seulement quelques dizaines de générations.

DES ESPÈCES QUI SE MODIFIENT JUSQU'À DEUX FOIS PLUS VITE QUE DANS D'AUTRES MILIEUX

Nombreux sont ceux qui doutent que l'évolution puisse se dérouler si rapidement. Darwin lui-même écrivait: «Nous ne voyons rien de ces grands changements tandis qu'ils se produisent, jusqu'à ce que la main du temps les ait frappés au sceau des âges anciens.» Pourtant, sous la pression implacable de la sélection naturelle, l'évolution procède parfois bien plus rapidement que Darwin ne l'envisageait. C'est particulièrement vrai pour les organismes qui se reproduisent plusieurs fois par année.

Dans une métaanalyse de plus de 1600 études de cas, publiée en 2017, une équipe dirigée par Marina Alberti, de l'université de Washington, a montré qu'en effet, l'urbanisation accélère l'évolution. Les taux de changements des espèces sont plus élevés, parfois jusqu'à deux fois plus, dans les écosystèmes urbains.

Si une évolution-adaptation se produit rapidement tout autour de nous en milieu urbain, cela signifie-t-il que tout va bien? Toutes les espèces parviendront-elles à s'adapter aux milieux modifiés par les humains? Hélas non. Seules quelques-unes seront en mesure de survivre, de se développer, voire de coloniser les villes. Et à chaque histoire de succès, on comptera peut-être une dizaine de cas d'extinctions d'espèces, lesquelles n'auront pas eu le temps de s'adapter aux conditions de la vie citadine. La plupart des plantes et des animaux continueront à avoir besoin de réserves, d'aires protégées, de lois et d'autres mesures de protection permettant de sauvegarder des habitats non touchés par l'homme, au milieu des paysages de plus en plus urbains du futur.

Aucun autre habitat extrême n'a eu une présence aussi étendue

Néanmoins, le fait que les écosystèmes urbains gagnent de plus en plus de terrain représente un nouveau chapitre captivant de l'histoire de la vie sur Terre. Jusqu'à aujourd'hui, aucun autre habitat extrême n'a eu une présence aussi étendue sur la planète. En tout point du globe, les villes partagent une série de caractéristiques communes auxquelles la flore et la faune s'adapteront de façon similaire. La plupart des espèces urbaines, tels les pigeons des villes, les trèfles blancs et les pissenlits, se retrouvent partout sur la planète: des naturalistes amateurs pourraient ainsi aider les chercheurs à suivre l'étendue et le rythme des changements qui touchent ces espèces. D'ailleurs, l'évolution des escargots à la coquille jaune a été révélée par des volontaires grâce à l'application SnailSnap sur leur téléphone. Des données sur plus de 12000 escargots ont ainsi été récoltées dans les villes néerlandaises.

En évoluant de façon parallèle sous l'effet de conditions urbaines comparables, toutes ces espèces intrépides pourraient devenir au fil du temps de plus en plus semblables. À l'ère de l'urbanisation galopante, l'évolution en ville se distinguerait alors de l'évolution en milieu naturel ou en milieu humain non urbain. Puisqu'un tel scénario écologique n'a pas de précédent, nous pouvons seulement tenter de deviner de quoi le futur sera fait. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Schilthuizen, *Darwin Comes to Town : How the Urban Jungle Drives Evolution*. Picador. 2018.

N. Halfwerk et al., *Adaptive changes in sexual signaling in response to urbanization*, *Nature Ecology & Evolution*, publié en ligne le 10 décembre 2018.

C. M. Gaynor et al., *The influence of human disturbance on wildlife nocturnality*, *Science*, vol. 360, no. 1232-1235. 2018.

M. Alberti et al., *Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations*, *PNAS*, vol. 114(34), pp. 8951-8956. 2017.



ESSENTIEL

À la fin du XIX^e siècle, Pavlov découvrit que tous les réflexes ne sont pas innés et qu'il pouvait conditionner des chiens à saliver au seul son d'une clochette, en associant préalablement ce son à la présentation de nourriture.

Il démontra aussi la possibilité de modifier les conditionnements.

Ces découvertes ont notamment inspiré les thérapies cognitivo-comportementales, qui visent à neutraliser les apprentissages inadéquats.

AUTEUR



DANIELA OVADIA
codirectrice du laboratoire Neurosciences et société de l'université de Pavie, en Italie, et journaliste scientifique.

Le chien qui a fait Pavlov

En découvrant le réflexe conditionné, le médecin et physiologiste russe a profondément influencé la psychologie moderne.

Le chien qui se met à saliver au son d'une clochette est l'un des animaux les plus célèbres de l'histoire des sciences. Et c'est l'étude assidue de l'espèce canine qui valut en 1904 à Ivan Petrovitch Pavlov le prix Nobel de médecine et de physiologie, en récompense de ses travaux

sur le fonctionnement de l'appareil digestif. Pavlov rassembla ensuite ses observations dans un ouvrage intitulé *Les Réflexes conditionnés*.

Cet essai est considéré comme un classique de la psychologie. Pourtant, au début de sa carrière, son auteur ne s'intéressait absolument pas à cette discipline, dont il tenait les fondements pour aléatoires. Ce qui passionnait le docteur Pavlov, c'était la physiologie, en particulier l'étude du métabolisme. La découverte du concept de conditionnement, incontournable aujourd'hui dans l'analyse du comportement humain et animal, fut un effet collatéral de ses travaux.

Pavlov ouvrit d'ailleurs son ouvrage sur un réquisitoire passionné, où il déplorait l'intervention de la psychologie dans la compréhension du fonctionnement cérébral à l'aube du XX^e siècle. Il aurait préféré que cette étude demeurât dans le giron de la physiologie et, par conséquent, de l'analyse physique et chimique.

Pour ses expériences, Pavlov s'inspira de Descartes, qui concevait les animaux comme des machines capables de réagir à un stimulus environnemental afin de s'adapter à leur milieu. Selon le philosophe, ces réactions, dites réflexes, étaient déclenchées par le système nerveux de façon mécanique (sans intervention de «l'esprit»).

LA QUESTION INITIALE DE PAVLOV : POURQUOI SALIVE-T-ON ?

L'un des réflexes connus depuis l'Antiquité était celui de la sécrétion salivaire en réaction à la présentation de nourriture : des glandes situées dans la bouche produisent de la salive et envoient des messages à l'estomac pour le préparer à l'arrivée de la nourriture. Le projet initial de Pavlov était de chercher si la salive des chiens différait selon qu'elle était sécrétée en réponse à la nourriture ou à divers autres stimuli. Il la recueillait donc, afin d'en mesurer la consistance et la quantité.

Toutefois, dès ses premières expériences, Pavlov observa que le réflexe salivaire du chien n'était pas uniquement déclenché par la présence de nourriture, mais aussi par l'attente de celle-ci. Il existait donc une composante psychique qui méritait d'être analysée plus en détail.

DU SÉMINAIRE AU PRIX NOBEL

longtemps attiré par une carrière ecclésiastique au sein de l'Église orthodoxe, Pavlov abandonne finalement le séminaire pour suivre des cours de mathématiques, de physique et de sciences naturelles à l'université de Saint-Petersbourg. Il s'inscrit ensuite à la faculté de médecine et de chirurgie.

Pavlov soutient
sa thèse de doctorat
sur la physiologie de
la circulation sanguine.

1870-1879

1883

1848

Naissance d'Ivan
Petrovitch Pavlov
à Riazan, en Russie
centrale.



1879

Diplôme de médecin

1884

Pavlov s'installe à Breslau, en Allemagne, et se perfectionne dans l'étude du système digestif des chiens. C'est dans ce domaine qu'il remportera les plus brillants succès scientifiques.



Pavlov étudia alors l'effet d'un grand nombre de stimuli différents – son d'une clochette, éclairs lumineux, stimulations tactiles... –, qui étaient émis en même temps qu'on apportait la nourriture à l'animal. Ce qu'il découvrit stupéfia ses contemporains: n'importe quel stimulus sensoriel pouvait être associé à la nourriture, puis, quand on l'émettait sans présentation d'aliments, déclencher à lui seul le réflexe. D'un point de vue physiologique, il n'y avait aucune différence entre la salive sécrétée à la suite de l'apparition de la nourriture et celle produite lors de la perception du stimulus associé.

Il y a toujours de la place pour de nouveaux réflexes dans le cerveau humain

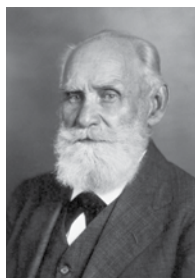
DEUX TYPES DE REFLEXES

Grâce à ces expériences, Pavlov distingua deux types de réflexes: le réflexe non conditionné, ou inné, dont la fonction est de préparer l'organisme à la digestion, et le réflexe conditionné, fruit d'un apprentissage inconscient lors duquel un stimulus – sonore par exemple – est associé mentalement à l'arrivée de la nourriture.

Le fait que les réflexes puissent être inculqués à l'animal et intégrés à son fonctionnement poussa Pavlov à modifier le modèle cartésien de l'animal-machine. Le savant russe y ajouta une dimension psychologique, envisagée selon un angle matérialiste qui préfigurait les neurosciences modernes. Il identifia le cortex cérébral (la couche externe du cerveau)

omme la partie noble et malléable de l'encéphale, grâce à des expériences sur des chiens qui en avaient été privés par une opération chirurgicale: ces animaux avaient encore des réflexes non conditionnés, mais ils étaient incapables d'apprendre à associer une réponse salivaire à de nouveaux stimuli.

Pavlov montra également qu'il était possible de modifier les réactions réflexes. Après avoir conditionné un chien à saliver au son d'une clochette, il associa ce stimulus à un élément désagréable: chaque fois que l'animal l'entendait, il recevait désormais un électrochoc. Au bout de quelques séances, le son de la clochette ne provoquait plus aucune salivation.



Pavlov est nommé directeur du département de physiologie de Saint-Petersbourg, poste qu'il occupera durant quarante-cinq ans. Il fait de cette structure l'un des meilleurs centres mondiaux d'étude du corps humain.

1890

Sous le régime soviétique, Pavlov est considéré comme l'un des plus éminents scientifiques du pays. Fort de sa position, il n'hésite pas à prendre la défense de plusieurs intellectuels durant les purges stalinienne.

1922-1936

1904

Prix Nobel de médecine et de physiologie pour ses découvertes sur le système digestif.



1936

Pavlov meurt entouré de ses élèves, auxquels il décrit minutieusement son agonie. Son dernier projet était en effet de léguer à ses successeurs un modèle des phases terminales de la vie, qui aurait associé mesures objectives et sensations subjectives du mourant.

Pavlov expliqua plus avant l'utilité des réflexes. Pour lui, l'animal répondait à son environnement en activant un système de «neuroanalyse» qui l'aidait à établir la nature des stimuli alentour. Il en tirait une «neuro-synthèse», c'est-à-dire qu'il déterminait si un stimulus était associé à quelque chose de connu, pour lequel il disposait d'une réaction toute prête. Il raccourcissait ainsi son temps de réponse, un atout fondamental en cas de danger.

LES BASES DE LA PLASTICITÉ CÉRÉBRALE

Pavlov était convaincu que ses conclusions s'appliquaient aussi à l'homme. «Plus un organisme est évolué, écrivit-il, plus il est habile [...] à s'adapter de façon précise et variée aux conditions environnementales.» La culture comme la société étaient selon lui interprétables comme des systèmes complexes de gestion des réflexes : les êtres humains se distinguaient des animaux en ce que leurs réflexes conditionnés étaient devenus beaucoup plus nombreux que leurs réflexes innés. Mais l'éducation de l'homme ne devait pas être si différente de celle de son meilleur ami canin : dans les deux cas, les stades de développement de complexité croissante se succédaient et certains apprentissages étaient «déprogrammés».

Selon Pavlov, le cerveau humain trouve toujours de la place pour emmagasiner de

nouveaux réflexes et il est toujours possible de modifier ceux qui existent. Cela signifie que même si la plupart du temps nous nous reposons sur l'habitude et sur l'apprentissage culturel, nous restons en mesure de changer nos schémas comportementaux.

C'est notamment de cette idée que sont nées les thérapies cognitivo-comportementales, qui visent à déprogrammer progressivement les apprentissages néfastes. Elles sont plus modérées que le comportementalisme pur et dur, selon lequel nous sommes le produit de nos conditionnements, à la liberté très limitée. Elles connaissent aujourd'hui une nouvelle jeunesse et leurs effets thérapeutiques sont reconnus dans de nombreuses pathologies, comme les troubles obsessionnels compulsifs et les états anxieux.

Contrairement à d'autres formes de psychothérapie, les thérapies cognitivo-comportementales ont une efficacité facilement mesurable, même selon les critères rigoureux des expérimentations cliniques. Voilà pourquoi la majorité des études confirmant l'utilité de la psychothérapie portent sur ce type d'intervention.

Nous devons donc aux chiens de Pavlov la première démonstration de la formidable nature plastique de notre cerveau, ainsi qu'une pensée rassurante : avec quelques efforts, nous pouvons toujours changer ce qui ne fonctionne pas correctement chez nous. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. P. Todes, **Pavlov's physiology factory**, Isis, vol. 88(2), pp. 205-246. 1997.

I. Pavlov, **Les Réflexes conditionnés**. PUF. 1977.

R

ENDEZ-VOUS

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

MYSTÉRIEUX DIVISEURS

La somme des diviseurs d'un nombre entier suscite une multitude d'interrogations. Depuis plus de deux millénaires, les passionnés tentent d'y répondre. Une tâche inachevée!

Marin Mersenne (1588-1648)



Les diviseurs de 6 sont 1, 2, 3 et 6. Si l'on ne considère que les diviseurs de 6 différents de 6, que l'on dénomme *parties aliquotes* de 6, ce sont 1, 2 et 3. Leur somme est égale à 6. Ainsi, la somme des parties aliquotes de 6 vaut 6. Depuis l'Antiquité, cette propriété inattendue intrigue les amateurs d'arithmétique et l'on appelle « nombres parfaits » les entiers, tels que 6, dont la somme de leurs parties aliquotes est égale à eux-mêmes.

L'entier 28, dont les parties aliquotes sont 1, 2, 4, 7 et 14 est le deuxième nombre parfait. Les pythagoriciens se sont intéressés à ces nombres, mais même plus tard dans l'Antiquité, on n'a trouvé que les quatre plus petits qui sont 6, 28, 496 et 8128. Au tournant de notre ère, Philon d'Alexandrie, dans son ouvrage sur la Création,

mentionne que si le monde a été créé en 6 jours et que la Lune tourne autour de la Terre en 28 jours, c'est parce que 6 et 28 sont des nombres parfaits. Saint Augustin (354-430) a repris la première affirmation.

Les nombres parfaits au-delà de 8128 sont 33 550 336, 8 589 869 056, 137 438 691 328, 2 305 843 008 139 952 128, etc. On connaît aujourd'hui 50 nombres parfaits. Ils sont tous de la forme $2^{p-1}(2^p-1)$ où 2^p-1 est un nombre premier. Les valeurs de p qui donnent les nombres parfaits connus sont :

2, qui donne $2^1(2^2-1)=6$; 3, qui donne $2^2(2^3-1)=28$; 5, qui donne $2^4(2^5-1)=496$; 7; 13; 17; 19; 31; 61; 89; 107; 127; 521; 607; 1279; 2203; 2281; 3217; 4253; 4423; 9689; 9941; 11213; 19937; 21701; 23209; 44497; 86243; 110503; 132049; 216091; 756839; 859433; 1257787; 1398269; 2976221; 3021377; 6972593; 13466917;

NOMBRES PREMIERS ET SUITES ALIQUOTES

Le 3 janvier 2018, Jonathan Pace, à l'université Stanford, recherchait un candidat aux grands nombres premiers et participait ainsi à un grand calcul distribué fonctionnant depuis plus de 20 ans. Il a eu la chance de trouver le nombre $2^{77\ 232\ 917} - 1$. C'est le plus grand nombre premier connu, et il a plus de 23 millions de chiffres décimaux. Si vous souhaitez tenter votre chance, consultez le site internet GIMPS qui coordonne cette recherche de nombres premiers records : <https://www.mersenne.org>. Le nombre premier est un nombre de Mersenne, c'est-à-dire de la forme $2^k - 1$. En espaçant les chiffres d'un millimètre, l'écriture du

nombre premier record occuperait une longueur de 23 kilomètres, et au rythme d'un chiffre par seconde, il vous faudrait 269 jours pour l'écrire. La découverte détermine le 60^e nombre parfait, qui est : $2^{77\ 232\ 916} (2^{77\ 232\ 917} - 1)$. Ce nombre parfait a deux fois plus de chiffres décimaux que le nombre premier qui donne naissance. Les nombres parfaits sont ceux qui sont égaux à la somme de leurs « parties aliquotes », c'est-à-dire de leurs diviseurs différents d'eux-mêmes. Les trois plus petits sont : $6 = 1 + 2 + 3$; $28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$; $496 = 2^4(2^5 - 1) = 1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 31 + 62 + 124 + 248$

On notera $s(n)$ la somme des parties aliquotes de l'entier n .
Voici quelques définitions complémentaires :
- n est parfait si $s(n) = n$.
- n et m forment une paire amiable si $s(n) = m$ et $s(m) = n$.
- $n_1, n_2, \dots, n_k$ constituent une chaîne sociable si :
 $s(n_1) = n_2, s(n_2) = n_3, \dots, s(n_k) = n_1$.
La suite aliquote partant de n est la suite :
 $n, s(n), s(s(n)), s(s(s(n))), \dots$

20996011; 24036583; 25964951; 30402457; 32582657; 37156667; 42643801; 43112609; 47885161; 74207281; 77222917.

Les plus grands, à partir du 35^e, proviennent des calculs du projet GIMPS (<https://www.mersenne.org/primes/>) qui, depuis 1996, organise une recherche distribuée systématique pour découvrir ces nombres. Et il est possible qu'entre les trois derniers de la liste se glissent d'autres nombres parfaits pairs non encore découverts.

Les nombres premiers de la forme $2^p - 1$ sont dénommés «nombres premiers de Mersenne». Vers 300 avant notre ère, Euclide, dans le livre IX de ses *Éléments*, a démontré que si $2^p - 1$ est un nombre premier, alors $2^{p-1}(2^p - 1)$ est un nombre parfait pair. Au XVII^e siècle, le grand Leonhard Euler a prouvé la réciproque: si un nombre pair est parfait, alors il est nécessairement de la forme $2^{p-1}(2^p - 1)$ où p est tel que $2^p - 1$ soit un nombre premier. Trouver des nombres premiers de Mersenne est donc équivalent à trouver des nombres parfaits pairs. GIMPS signifie d'ailleurs *Great internet Mersenne Primes Search*.

On déduit de la caractérisation des nombres parfaits par Euclide et Euler que les nombres parfaits pairs à partir de 28 sont des sommes de cubes de nombres impairs successifs. On a par exemple: $28 = 1^3 + 3^3$; $496 = 1^3 + 3^3 + 5^3 + 7^3$; $8128 = 1^3 + 3^3 + 5^3 + 7^3 + 9^3 + 11^3 + 13^3 + 15^3$.

Bien que connaissant la forme que prend nécessairement tout nombre parfait pair, on ne sait pas démontrer qu'il en existe une infinité. On conjecture que oui.

À l'inverse, on pense qu'il n'existe aucun nombre parfait impair, mais c'est encore une affirmation non démontrée. Les travaux mathématiques sur les nombres parfaits impairs ont

conduit à quelques résultats remarquables qui montrent que, s'il en existe, ils seront difficiles à trouver. On sait que si N est un nombre parfait impair, alors il est supérieur à 10^{1500} et comporte au moins 101 diviseurs premiers (résultat de Pascal Ochem et Michaël Rao, publié en 2012). Parmi les facteurs premiers d'un tel N , s'il existe, au moins 10 sont distincts (résultat de Pace Nielsen, publié en 2015). De plus, si 3 n'est pas un diviseur de N , alors N comporte au moins 12 facteurs premiers distincts (résultat de Pace Nielsen, publié en 2007).

UN MILLIARD DE PAIRES AMIABLES

Si l'on note $s(n)$ la somme des parties aliquotes de n et qu'on s'amuse à calculer patiemment les valeurs de cette fonction, entier après entier, on découvre que $s(220) = 284$ et que $s(284) = 220$. En effet, 284 est divisible par 1, 2, 4, 71 et 142, dont la somme est 220, tandis que 220 est divisible par 1, 2, 4, 5, 10, 11, 20, 22, 44, 55 et 110, dont la somme est 284.

Cette association miraculeuse des entiers 220 et 284 a retenu l'attention des amateurs de nombres qui ont qualifié de tels couples, où la somme des diviseurs de l'un est égale à la valeur de l'autre, de «paires amiables» ou «paires aimables» ou «nombres amicaux». Les dix premières paires amiables sont: 220-284, 1184-1210, 2620-2924, 5020-5564, 6232-6368, 10744-10856, 12285-14595, 17296-18416, 63020-76084, 66028-66092.

Avant Euler, on ne connaissait que trois paires de nombres amiables. Ne dédaignant pas ces problèmes arithmétiques, Euler découvrit cinq méthodes pour construire des paires de nombres amiables. Grâce à elles, il proposa

MAURIC



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

2

LES DIVISEURS D'UN ENTIER

Une fois qu'un entier n est écrit sous la forme d'un produit

de nombres premiers, par exemple $n = 3\,400 = 2^3 \cdot 5^2 \cdot 17$, il est facile de connaître ses diviseurs et leur somme sans faire de calculs compliqués. Expliquons pourquoi. Les diviseurs de n sont les nombres ayant comme facteurs premiers des nombres premiers pris parmi ceux qui apparaissent dans la décomposition de n , avec des exposants inférieurs ou égaux à ceux qui y apparaissent. Pour $n = 3\,400$, il y aura donc $2^3 \cdot 5^2 \cdot 17$, $2^2 \cdot 5^2 \cdot 17$, $2^3 \cdot 5$, $5^2 \cdot 17$, etc. La somme $S(3\,400)$ des diviseurs de 3 400 (en acceptant 3 400 lui-même) est alors assez facile à connaître sans avoir à les énumérer. Elle est

donnée en développant le produit $(1 + 2 + 2^2 + 2^3)(1 + 5 + 5^2)(1 + 17)$.

En effet, pour développer ce produit, on prend un terme dans chaque parenthèse et on les multiplie, ce qui donne exactement la somme des diviseurs. On utilise ensuite la formule $1 + a + a^2 + \dots + a^k = (a^{k+1} - 1)/(a - 1)$, d'où: $S(3\,400) = [(2^4 - 1)/(2 - 1)] \times [(5^3 - 1)/(5 - 1)] \times [(17^2 - 1)/(17 - 1)] = (15 \times 124 \times 288)/(4 \times 16) = 8\,370$.

On vérifie le résultat

en recherchant patiemment

tous les diviseurs de 3 400 et en les additionnant: $S(3\,400) = 1 + 2 + 4 + 5 + 8 + 10 + 17 + 20 + 25 + 34 + 40 + 50 + 68 + 85 + 100 + 136 + 170 + 200 + 340 + 425 + 680 + 850 + 1\,700 + 3\,400 = 8\,370$.

la méthode décrite avec 3 400

est, bien sûr, générale. On comprend que le problème de calculer la somme des diviseurs d'un entier se réduit à celui de sa factorisation en produit de nombres premiers. Comme le problème de la factorisation est difficile, le problème du calcul de la somme des diviseurs d'un nombre l'est aussi. Cela rend délicats et longs les calculs pour trouver les nombres parfaits, les paires amiables, les chaînes sociables et, bien entendu, les suites aliquotes.

C'est aussi ce qui explique l'impossibilité pratique de continuer le calcul d'une suite aliquote quand on arrive à de très grands nombres avant de grands facteurs premiers.

39 nouvelles paires. Adrien-Marie Legendre proposa aussi une nouvelle paire de nombres amiables en 1820.

Le mathématicien belge Paul Poulet, mort en 1946, fut le premier à utiliser, à la main bien sûr, les tests de primalité mis au point au XIX^e siècle par le Français Édouard Lucas, inventeur du fameux casse-tête des tours de Hanoï. Poulet en tira 105 nouvelles paires de nombres amiables.

En 1946, on connaissait 390 paires de ce type. Grâce aux ordinateurs, on a pu aller bien plus loin. En 2002, quand j'abordai ce sujet dans un article de *Pour la Science*, on connaissait seulement 2 millions de paires amiables. Aujourd'hui (au 8 janvier 2019), on en

on démontre que s'il existe une paire amiable (m, n) pour laquelle m et n n'ont pas de diviseurs communs, alors le produit mn dépasse 10^{67} .

Le mathématicien hongrois Paul Erdős (toujours lui!) a prouvé en 1955 que la proportion de nombres entiers appartenant à une paire amiable parmi les entiers inférieurs à n tend vers 0 quand n tend vers l'infini: la densité des nombres amiables est nulle.

Quand on additionne les deux nombres d'une paire amiable, par exemple $5232 + 6368 = 12600$, on remarque qu'assez fréquemment cette somme est divisible par 10. Une exploration systématique indique que 73 des 100 premières paires ont une somme divisible par 10 et que 825 des 1000 premières paires ont une somme divisible par 10. On conjecture donc que la proportion de paires amiables dont la somme est divisible par 10 tend vers 100% quand on fait tendre vers l'infini le nombre de paires prises en compte.

La proportion des entiers appartenant à une paire amiable tend vers zéro

on connaît 1222571199 et ce nombre change tous les jours. Elles se trouvent sur le site internet <https://sech.me/ap/> tenu par Sergei Chernykh, un passionné de nombres qui vit à Stockholm.

Un projet de calcul distribué dédié à cette recherche a été mis en place dont l'objectif est de connaître toutes les paires amiables dont le plus petit élément est inférieur à 10^{20} (voir <https://sech.me/boinc/Amicable/>).

Le site de Sergei Chernykh indique combien des chercheurs de paires de nombres amiables en ont trouvé. Il précise par exemple que Legendre en a trouvé une, que Poulet en a trouvé 105 et que les deux plus gros découvreurs sont Robert Gerbicz, qui en a trouvé 173470689 et Sergei Chernykh lui-même, qui détient le record avec 1029730080 paires amiables à son actif, soit plus de 80% des paires connues!

Les deux nombres des paires amiables connues ont toujours la même parité: ils sont tous deux pairs ou impairs. On ignore s'il existe des paires amiables de type pair-impair, mais s'il en existe, on démontre que le nombre pair sera un carré ou le double d'un carré.

On constate que les entiers d'une paire de nombres amiables ont toujours un diviseur commun. On ignore si cela est vrai en général, mais

LES CHAINES SOCIABLES

Parfois, lorsqu'on part d'un entier n et que l'on calcule $s(n)$, $s(s(n))$, $s(s(s(n)))$, etc., on retombe sur n . On nomme «chaînes sociables» ces suites qui reviennent à leur point de départ. Si l'on retrouve n tout de suite, c'est que n est un nombre parfait; si on le retrouve seulement avec $s(s(n))$, c'est que n et $s(n)$ forment une paire amiable. Les autres chaînes sociables sont assez mal connues et on ne progresse guère à leur sujet. On ne connaît que 5398 chaînes sociables d'ordre 4, 1 d'ordre 5, 5 d'ordre 6, 4 d'ordre 8, 1 d'ordre 9 et 1 d'ordre 28. On ignore par exemple s'il existe des chaînes sociables à trois maillons $n \rightarrow s(n) \rightarrow s(s(n)) \rightarrow n$. Il n'en existe peut-être pas, mais comment le démontrer?

Les valeurs de la fonction $n \rightarrow s(n)$ sont relativement faciles à calculer quand on connaît une décomposition de n en produit de facteurs premiers (voir l'encadré 2). Cependant, et c'est bien là le problème, si certains grands nombres se factorisent aisément, par exemple ceux de la forme 2^k , d'autres sont extrêmement difficiles à factoriser et aujourd'hui on ne connaît pas de méthode permettant de factoriser facilement n'importe quel nombre composé de 200 chiffres.

QUE SE PASSE-T-IL QUAND ON RECOMMENCE ?

Finalement, vient à l'esprit la question suivante: partant d'un entier n , que se passe-t-il quand on calcule $s(n)$, $s(s(n))$, $s(s(s(n)))$ et que l'on poursuit autant que possible?

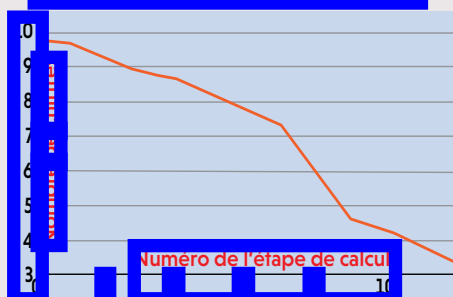
Les suites obtenues sont dénommées «suites aliquotes». Elles sont l'objet d'un travail acharné de calculs et d'études mathématiques. La communauté qui s'y intéresse mobilise des capacités

LES SUITES ALIQUOTES

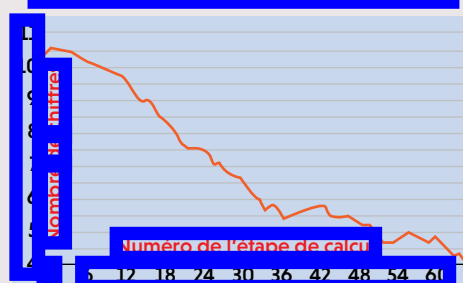
Beaucoup de suites aliquotes $s(n), s(s(n)), s(s(s(n))), \dots$ aboutissent à un nombre premier qui donne alors, par récurrence, naissance à une suite qui conduit à un nombre parfait, ou à un nombre appartenant à une paire amiable ou à une chaîne sociable, et restent donc bornées. La question de savoir s'il existe des suites aliquotes tendant vers l'infini reste jusqu'aujourd'hui non résolue, malgré les efforts considérables investis.

la conjecture de Catalan : **il n'existe aucune suite aliquote (infinie) non bornée.** Plusieurs résultats théoriques suggèrent qu'elle est juste, mais d'autres semblent favoriser la conclusion inverse ([voir le texte principal](#)). Voici trois exemples de suites aliquotes bornées, suivies de trois exemples de suites aliquotes dont le statut reste inconnu et qui pourraient donc être non bornées et invalider la conjecture de Catalan. Pour les trois dernières suites le calcul s'arrête parce qu'on rencontre un entier qu'on ne parvient pas, aujourd'hui, à factoriser.

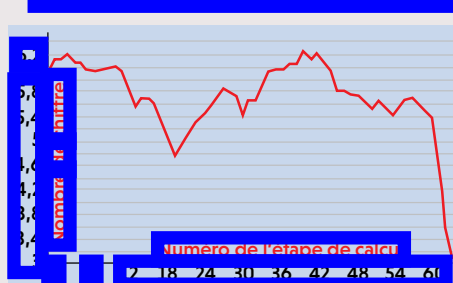
A. $n = 555\ 555\ 555$. La suite aliquote décroît sans à-coups, jusqu'à arriver au nombre premier 233, qui donne 1 puis 0



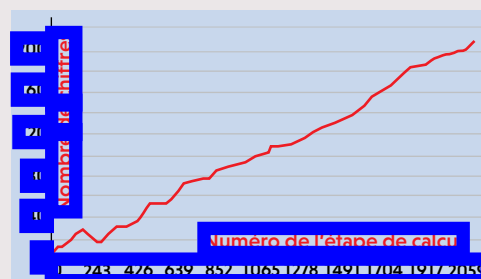
3. $n = 1\,960\,000\,000$. La suite décroît moins régulièrement que la première, mais finit par arriver au nombre premier 1 093.



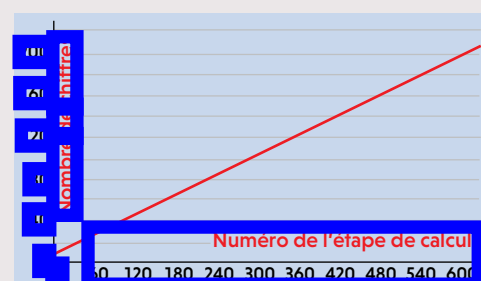
$n = 123\,456$. La suite est hésitante, puis arrive à un point où elle chute brutalement vers le nombre premier 113.



D. $n = 276$. La suite semble vouloir monter régulièrement. On doit arrêter le calcul, car on tombe sur un facteur de 205 chiffres qui bloque le calcul. L'entier 276 est le plus petit entier conduisant à un tel blocage.

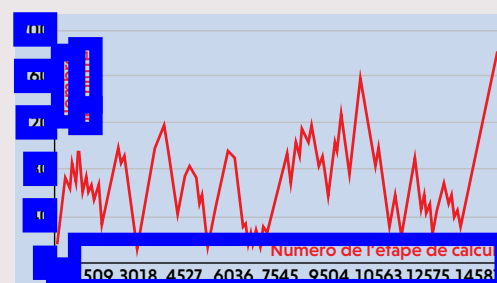


$n = 19\,560$. La suite semble
 extrêmement régulière et croissante jusqu'au
 blocage du calcul à cause d'un facteur
 de 203 chiffres. On imagine que, plus loin,
 elle continuera à monter à la même vitesse
 et donc ne sera pas bornée, ce qui contredira
 la conjecture de Catalan. Mais il manque
 la démonstration !



$n = 2.005\,020$. Ce cas illustre

à quel point une suite aliquote peut avoir un comportement irrégulier avant de sortir de la zone où les calculs sont possibles (ici, à cause d'un facteur de 180 chiffres). On a pu calculer 15 072 termes de la suite avant d'arriver à un facteur trop grand qui bloque le calcul. Le fichier de calcul associé à cette suite fait 845 pages !



• vérifiez les calculs ou faites-en d'autres en demandant (pour A) :
<http://factordb.com/sequences.php?se=1&q=55555555&action=all&fr=0&to=100>

SUR LE WEB

Point de rencontre
pour les passionnés
des questions traitées
dans l'article :
www.mersenneforum.org

Site dédié aux suites
liques où tout le monde
peut contribuer :
<http://yafu.myfirewall.org/yafu/>

Pour suivre au jour le jour
les calculs des séquences
aliquotes :
[www.rechenkraft.net/
aliquot/AllSeq.html](http://www.rechenkraft.net/aliquot/AllSeq.html)

site, riche en informations,
d'un groupe français
Jean-Luc Garambois,
Cédric Barret, Olivier
Huber, Matthieu
Bachschmidt, Youssef
Chtaibi, Francis Jamm) sur
des suites aliquotes :
www.aliquotes.com

informatiques colossales, tant l'excitation curieuse que l'âme est forte. Un étonnant groupe de passionnés français, qui inclut Jean-Luc Garambois, un professeur des écoles habitant dans l'Est de la France, et Paul Zimmermann, un chercheur de l'Inria à Nancy, s'attache depuis plus de quinze ans à comprendre ces suites, aussi bien en menant des calculs qu'en formulant des conjectures et parfois en démontrant des résultats mathématiques.

Que peut-il se passer quand on s'engage dans le calcul d'une suite aliquote $s(n)$, $s(s(n))$, $(s(s(n)))$, ...? Voici les diverses éventualités.

SUITES ALIQUOTES - SIX CAS

Cas 1. Les nombres 1 et 0 n'ont pas de diviseur différent d'eux-mêmes et donc $s(1)=s(0)=0$. Le calcul des suites aliquotes à partir de 0 ou 1 s'arrête immédiatement.

Cas 2. Les nombres premiers p , par définition, n'ont que 1 comme partie aliquote. Ils donnent donc 1, puis 0 : $n \rightarrow 1 \rightarrow 0$.

Cas 3. Certains nombres reviennent sur eux-mêmes après un cheminement plus ou moins long, car ils appartiennent à une chaîne sociable. Partant par exemple du nombre 12496, repéré par Poulet en 1918, on passe par 14288, puis 5472, 14536, 14264 qui redonne 12496.

Cette chaîne sociable d'ordre 5 produit une suite aliquote périodique et c'est aussi le cas pour les nombres parfaits et les nombres amiables :

$28 \rightarrow 28 \rightarrow 28 \rightarrow \dots$;
 $220 \rightarrow 284 \rightarrow 220 \rightarrow 284 \rightarrow 220 \rightarrow 284 \rightarrow \dots$

Cas 4. La suite aliquote, après un parcours plus ou moins long, tombe sur un nombre premier qui donne 1, puis 0 :

$75 \rightarrow 49 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 1 \rightarrow 0$.

Par exemple, la suite aliquote partant de 285612 compte 490 termes avant d'arriver au nombre premier 59, qui donne 1 puis 0. Vous pouvez le vérifier grâce au site internet :

<http://factordb.com/sequences.php?se=18&aq=285612&action=all>

Ce site affiche toutes les étapes avec, pour chaque nombre calculé, sa décomposition en facteurs premiers, ce qui lui prend environ 20 secondes.

Cas 5. La suite aliquote tombe à un moment sur un nombre appartenant à une chaîne sociable et se met donc à tourner en rond. Ainsi, le nombre 2856, après 29 étapes, tombe sur la seule chaîne sociable d'ordre 28 connue (voir : <http://factordb.com/sequences.php?se=18&aq=2856&action=all>).

Cas 6. Dernière éventualité, la suite aliquote continue indéfiniment sans repasser deux fois par le même nombre et tend donc vers l'infini.

Ce dernier cas n'a jamais été rencontré : certaines suites aliquotes semblent se poursuivre très longtemps, mais la difficulté de la factorisation, quand les nombres de la suite deviennent trop grands, fait que l'on ne peut poursuivre le calcul. Ces suites aux statuts indéterminés fascinent les mathématiciens.

Parmi les nombres entiers inférieurs à 1000, on sait que tous, sauf peut-être cinq, donnent des suites aliquotes bornées (cas 1 à cas 5). En revanche, les suites aliquotes engendrées par 276, 552, 564, 660, 966 ont un statut inconnu. Elles correspondent peut-être au cas 6. Ces cinq nombres sont dénommés les « cinq de Lehmer » en mémoire du mathématicien américain Derrick Lehmer, mort en 1991, qui découvrit leur statut particulier. Pour 276, on a calculé

4

LE GRAPHE MYSTÉRIEUX

À la fonction $n \rightarrow s(n)$

la somme des parties aliquotes de n , on associe un graphe infini. Les nœuds sont les entiers, et il y a un arc reliant n à $s(n)$ pour chaque entier n (une partie du graphe est représentée ci-contre). Voyons quelques questions sur lesquelles on travaille aujourd'hui :

Certains entiers n sont extrêmes d'un arc et s'écrivent $n = s(m)$ pour un certain entier m . On les qualifie d'« atteignables » ; les autres sont dits inatteignables.

En admettant vraie la conjecture de Goldbach, la proportion des nombres impairs non atteignables est nulle à l'infini. Pour les

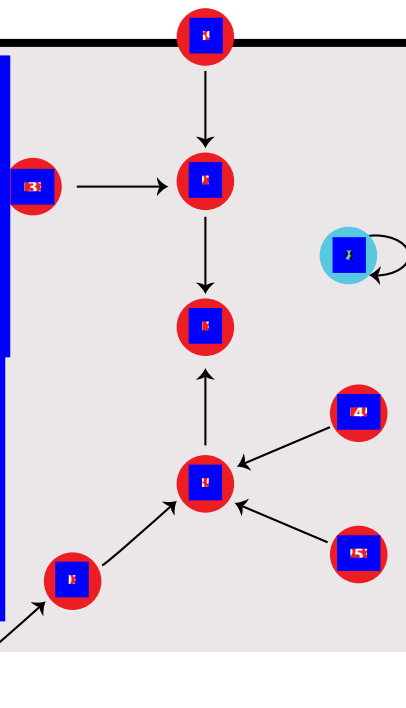
nombre pairs, Paul Erdos a prouvé en 1973 que les nombres pairs inatteignables représentent, à l'infini, une proportion strictement positive des nombres pairs.

En 2015, Florian Luca et Carl Pomerance ont prouvé que les nombres pairs atteignables représentent aussi une proportion strictement positive des nombres pairs.

2. De même que, partant de n , on peut étudier la suite aliquote $n, s(n), s(s(n)), \dots$, il est intéressant de savoir ce qui se passe si on inverse la recherche : partant de n , on recherche n_1 tel que $s(n_1) = n$, puis on recherche n_2 tel que $s(n_2) = n_1$, etc. Cela revient à

suivre les flèches du graphe dans le sens opposé des flèches. Cette recherche est bloquée quand on arrive à un nombre inatteignable. La question la plus simple à ce sujet est : existe-t-il des entiers permettant de poursuivre indéfiniment ce chemin à reculons ? Il est très probable que oui.

3. Le graphe comporte plusieurs composantes connexes (parties non reliées au reste du graphe). On en connaît certaines, mais sont-elles en nombre infini ? Toute structure possible de graphes finis se trouve-t-elle quelque part dans le graphe aliquote ? Jean-Luc Garambois conjecture que oui.



2122 termes de la suite aliquote. On reste coincé car, quand on arrive au terme 2122, on doit factoriser un nombre de 211 chiffres pour calculer le nombre suivant (voir l'encadré 3). On a bien trouvé les facteurs premiers 2, 3, 3, 7, 19, 709 de ce nombre, mais le facteur restant est un entier de 205 chiffres que l'on n'arrive pour l'instant pas à factoriser. Essayez :

<http://factordb.com/sequences.php?se=18730=2768&action=all>

La suite aliquote la plus longue connue est celle dont le point de départ est 2005020. Elle comporte 15072 termes connus.

La suite aliquote ayant pour point de départ 2340 est remarquable, car elle conduit au bout de 790 étapes à un nombre de 216 chiffres dont l'un des facteurs comporte 201 chiffres et que l'on n'a pas réussi à factoriser à ce jour.

DEUX CONJECTURES CONTRADICTOIRES

Le mathématicien franco-belge Eugène Catalan a conjecturé en 1888 que toutes les suites aliquotes étaient bornées, se terminant par 0 ou par un cycle. Un argument assez fort en faveur de cette conjecture est la démonstration que la moyenne des $s(n)/n$ tend vers $\pi^2/6 - 1 = 0,644934...$ quand n tend vers l'infini. En effet, ce résultat signifie que $s(n)$ est, le plus souvent, inférieur à n . Si on assimile les nombres d'une suite aliquote à des nombres tirés au hasard parmi les entiers en suivant la règle que la moyenne de $s(n)/n$ tend vers $0,644934...$, alors nécessairement ils restent bornés. Cependant, c'est là un argument incomplet, car les éléments d'une suite aliquotes ne sont pas tirés au hasard ! On parle d'argument heuristique pour de telles conclusions fondées sur un résultat rigoureux, mais qui concernent seulement un modèle imparfait de ce qui se produit.

D'ailleurs, une autre conjecture a été proposée vers 1975 par le Britannique Richard Guy et l'Américain John Selfridge. Elle stipule que sauf pour une proportion nulle de nombres impairs n , la suite aliquote de n est bornée, et que sauf pour une proportion nulle de nombres pairs n , la suite aliquote de n tend vers l'infini.

La raison d'introduire une distinction entre n pair et n impair est que quand on passe de n à $s(n)$, la parité se conserve, sauf si n est un carré ou le double d'un carré. Comme cette éventualité est de plus en plus rare quand n devient grand, en pratique les changements de parité finissent par ne plus se produire et il faut donc raisonner en séparant les nombres pairs et les nombres impairs.

On sait établir que quand n est pair, la moyenne des nombres $s(n)/n$ tend vers $5\pi^2/24 - 1 = 1,056147...$, ce qui signifie que, en gros, $s(n)$ est supérieur à n . Et on sait aussi

prouver que quand n est impair, la moyenne des nombres $s(n)/n$ tend vers $3\pi^2/24 - 1 = 0,233700...$, ce qui signifie qu'en gros $s(n)$ est de plus en plus petit. Tout cela produit un argument fort en faveur de la conjecture de Guy et Selfridge.

CROISSANCE REPETEE

Une autre piste consiste simplement à tenter la construction explicite d'un entier dont on démontrerait qu'il engendre une suite aliquote tendant vers l'infini. Erdős a publié en 1976 une preuve, due au Néerlandais Hendrik Lenstra, que pour tout entier positif k , il existe des suites aliquotes croissantes pendant k étapes successives.

De son côté, Jean-Luc Garambois a formulé la conjecture que, pour tout k et pour tout C positif, il existe des entiers n tels que la suite aliquote partant de n est croissante d'un facteur C au moins à chaque étape, $s(n) \geq Cn$, et cela pendant k étapes au moins. Mieux: Razvan Barbulescu, qui est aujourd'hui à Sorbonne Université, a réussi en 2012 à démontrer la conjecture, ce qui en fait un théorème.

Puisqu'une suite aliquote monte parfois très vite et très longtemps, il ne serait pas surprenant qu'il existe des suites montant indéfiniment et donc correspondant au cas 6. Cela semble presque aller de soi quand on observe les représentations graphiques de certaines suites aliquotes (voir l'encadré 3, schéma E), mais en mathématiques, il ne suffit pas de voir et d'être persuadé soi-même, il faut démontrer !

Jean-Luc Garambois propose aussi sur son site un entier n tel que la suite aliquote partant de n est croissante pendant des millions d'étapes, chacun de ses 800 premiers termes ayant plus de 40 millions de chiffres (voir www.aliquotes.com/suite_termes_taille_record.html).

Les idées envisagées pour tenter de construire des suites aliquotes dont on démontrerait qu'elles sont indéfiniment croissantes deviennent de plus en plus précises; le mystère du cas 6 est peut-être en passe d'être résolu. Si c'était en partant d'idées proposées par un amateur passionné, ce serait remarquable.

D'autres questions concernant les antécédents aliquotes, les nombres inatteignables, la structure du graphe général des suites aliquotes se posent et sont très sérieusement étudiées. Elles associent, comme pour le travail sur la conjecture de Catalan, raisonnements mathématiques experts et calculs informatiques.

Si vous ne savez pas quoi faire de la puissance de votre ordinateur, rejoignez la famille des passionnées de ces problèmes et mettez votre machine au service d'une de ces questions résolument mystérieuses sur lesquelles l'humanité se penche depuis plus de deux millénaires. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Pomerance, **The Aliquot constant, after Bosma and Kane**, *The Quarterly Journal of Mathematics*, vol. 69(3), pp. 915-930. 2018.

C. Chum et al., **Numerical and statistical analysis of aliquot sequences**, *Experimental Mathematics*, en ligne le 18 juin 2018.

A. Booker, **Finite connected components of the aliquot graph**, *Mathematics of Computation*, vol. 87, pp. 2891-2902. 2018.

N. Bosma et B. Kane, **The Aliquot constant**, *Quart. J. Math.*, vol. 63, pp. 309-323. 2012.

F. Luca et C. Pomerance, **The range of the sum-of-proper-divisors function**, *Acta Arithmetica*, vol. 168, pp. 187-199. 2015.

AUTEUR



JOÏC MANGIN
édacteur en chef adjoint
Pour la Science

LA BALEINE BLEUE CHERCHE ENCORE DE L'EAU



Avec ses baleines monumentales, l'artiste japonaise Maki Ohkojima nous invite à repenser nos liens avec le vivant et nous alerte sur les dangers que nous courons à les oublier.



E

n 1973, le chanteur américain Steve Waring mettait en scène dans l'une de

prises avec la pollution. Rappelez-vous : « Elle a trouvé du DDT / Un pétrolier / Du détergent / Beaucoup de choses / Mais pas de l'eau. » L'artiste japonaise Maki Ohkojima a également eu recours aux cétacés pour alerter sur l'état du monde.

À l'occasion d'une carte blanche proposée par l'Aquarium de Paris, elle a installé *L'Œil de la baleine*, une fresque géante de 300 mètres carrés où s'ébattent cinq baleines (voir ci-contre). L'objectif : sensibiliser l'opinion sur les océans en péril et les dégâts causés par l'espèce humaine.

L'œuvre est le fruit d'un séjour à bord de la goélette scientifique *Tara*, lors d'une résidence d'artiste organisée par la fondation Tara Expéditions soutenue par la créatrice Agnès B. Pendant son périple d'un mois autour de l'archipel nippon, Maki Ohkojima s'est nourrie de conversations avec les scientifiques embarqués pour s'initier au fonctionnement des multiples écosystèmes marins.

L'un des cétacés a été peint directement sur le mur. Les quatre autres ont été conçus à Awa-Shima, une petite île de l'est du Japon, avec l'aide des villageois qui ont participé à la broderie et à la couture de différents éléments de *L'Œil de la baleine*. L'essentiel est constitué de cuir peint à l'acrylique, tandis que des objets incongrus, comme des plumes de paon, parachèvent l'ensemble. Chaque œuvre,

monumentale, est en fin de compte l'assemblage d'une multitude de petits détails donnant au tout une éclatante richesse visuelle qui peut rappeler les compositions grouillantes d'un autre artiste japonais, Takashi Murakami.

Sur l'une des baleines, du corail, un organisme symbiotique associant animal et végétal, évoque le fonctionnement de l'océan tout entier fondé sur des cycles mettant en scène les deux règnes. De même, une baleine morte devient un écosystème à part entière pour d'autres organismes qui en extirpent l'énergie : poissons nécrophages, mollusques, vers, crustacés... « Le 6 février 2017, se souvient Maki Ohkojima, j'ai vu des baleines dans les flots. L'une était morte et de nombreuses créatures (oiseaux marins, requins...) venaient dévorer son corps. C'était pour moi un symbole ».

Un autre cétacé a le ventre empli de bouts de plastiques récupérés par l'artiste elle-même lors de promenades quotidiennes sur une plage. Sur une nageoire, de nombreux organismes illustrent la diversité des formes planctoniques. Eux aussi sont victimes de nos déchets. Ils se nourrissent de microplastiques et les transmettent à toute la chaîne alimentaire, des poissons jusqu'aux humains.

Sur la troisième baleine, plancton toujours. Disposé autour de la tête d'un petit garçon, il le « protège » des représentations d'essais nucléaires et de la bombe Little Boy (« petit garçon » en français) larguée sur Hiroshima. L'avenir de la planète dépendrait de ce plancton.

À côté, une dernière baleine montre l'unité du vivant. L'oxygène que nous respirons a été en partie produit par des microorganismes il y a plusieurs millions d'années. Le pétrole dont nous dépendons tant résulte de la transformation de matières organiques enfouies profondément par d'autres microorganismes. Selon l'artiste, nous devrions avoir plus conscience de ce qui nous unit à notre environnement. Ici, des papillons migrants, là la structure en double hélice de l'ADN illustrent ces liens et cette unité. Nous sommes tous les rouages d'un vaste écosystème à protéger. Aidons la baleine bleue à déboucher tous ses tuyaux! ■

le site de Maki Ohkojima : www.ohkojima.com



l'auteur a récemment publié : **Pollock, Turner, Van Gogh / Vermeer et la science...** (Belin 2018)

LES AUTEURS

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

L'ASCENSION DE LA CHAÎNE FONTAINE

Une longue chaînette glissant hors d'un bocal suspendu au-dessus du sol se soulève spontanément. Le phénomène a intrigué les physiciens, qui ont fini par le comprendre.

En 2012, une vidéo de Steve Mould, un présentateur anglais d'émissions scientifiques, est devenue rapidement virale. Qu'y voit-on ? Une longue chaînette quitte un récipient surélevé pour s'écouler vers le bord du récipient sans le toucher, au lieu de glisser contre lui comme le fait une simple corde (voir la figure ci-contre). Ce phénomène inattendu a provoqué la surprise du public... et interrogé les physiciens : d'où provient la force qui fait monter la chaînette ?

UNE POUSSEE INATTENDUE EXERCÉE PAR LE RÉCIPIENT

La réponse est troublante : c'est le récipient, pourtant immobile, qui propulse la chaînette vers le haut ! Comme nous le verrons, la vidéo d'une brique de bois propulsée vers le haut grâce à un tir

de carabine confirme cette explication et permet de mieux saisir les mécanismes à l'œuvre.

Cherchons d'abord à reproduire l'expérience avec la chaînette. Les premiers résultats ont été obtenus avec des chaînettes en métal, semblables à celles qui retiennent les bords d'évier.

Dans ce cas, de petites boules métalliques sont reliées entre elles par de petites tiges. L'ensemble de la chaîne reste souple, même si les segments qui la constituent sont parfaitement rigides. On place la chaîne dans un bocal et l'on fait pendre l'une de ses extrémités par-delà le bord, avec assez de longueur pour que la chaîne soit entraînée progressivement hors du récipient sous l'effet de son propre poids.

Après quelques instants, et notamment après que l'extrémité a touché le sol, un « régime permanent » s'établit : la chaîne s'élève au-dessus du récipient en formant

une arche et quitte le bocal à vitesse constante. La force motrice de ce phénomène est le poids de la partie de la chaîne qui se trouve en l'air entre le bocal et le sol. Elle est donc constante et d'autant plus grande que le bocal est surélevé.

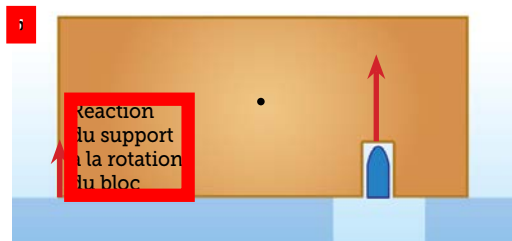
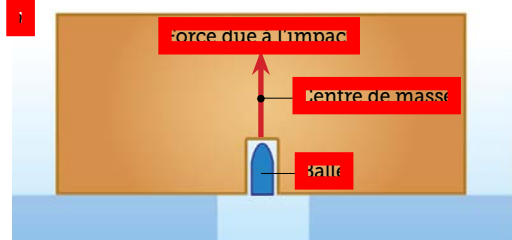
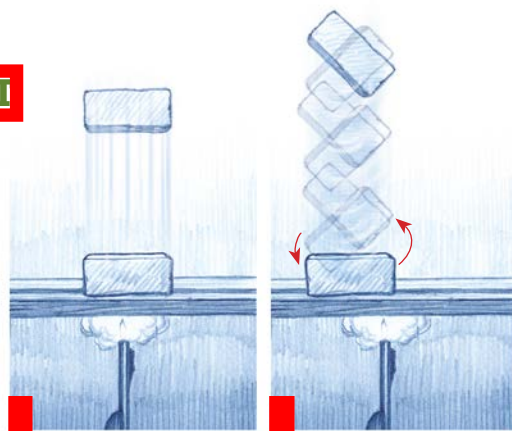
On constate ainsi que plus on soulève le bocal, plus la chaîne le quitte rapidement et plus la hauteur de l'arche est importante, selon une loi grossièrement proportionnelle. De plus, lorsqu'on incline le récipient, la chaîne s'échappe non plus selon la verticale, mais en faisant un angle par rapport à l'horizontale.

Effectuons un premier bilan des forces en jeu lorsque le dispositif est en

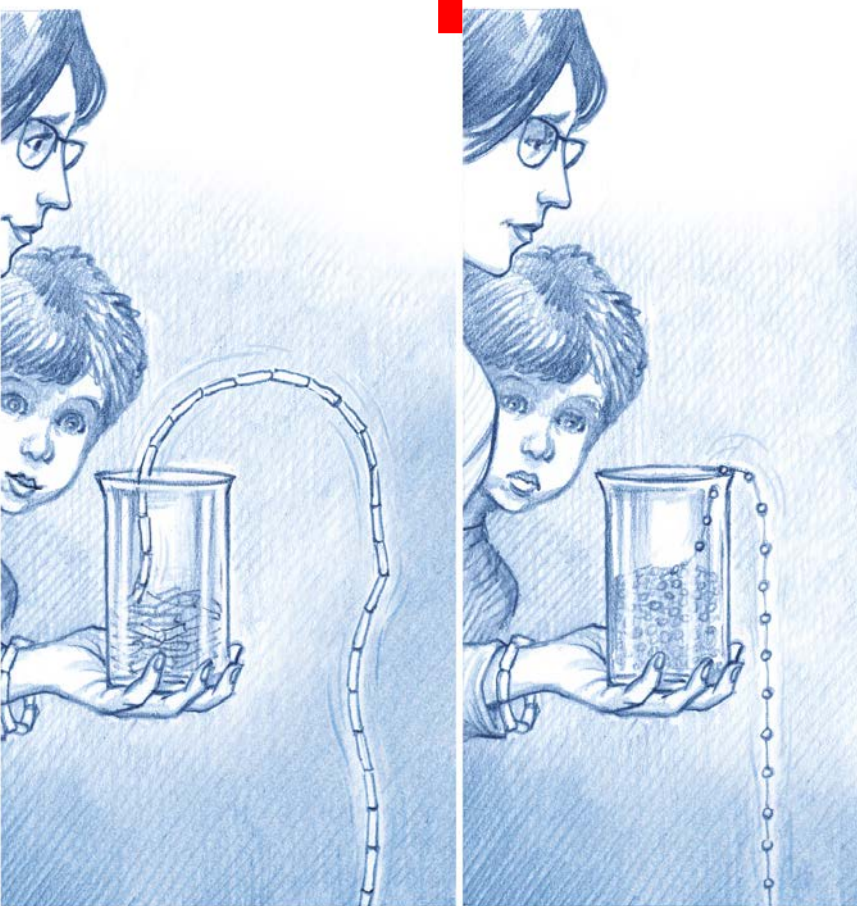


LE COUP DE POUCE DU SUPPORT

Une expérience simple montre que la force de réaction exercée sur un objet par son support fournit parfois un supplément de vitesse. On tire une balle verticalement depuis un bloc de bois posé sur une planche, soit de façon centrée (a et a'), soit assez loin du centre de masse du bloc (b et b'). Dans ce dernier cas, la force due à l'impact de la balle exerce un couple qui fait tourner le bloc sur lui-même. Mais au début, cette rotation est bloquée au niveau de l'arête de gauche : le bloc bute sur le support et rebondit sur lui, ce qui lui procure un élan supplémentaire. De ce fait, le bloc monte en l'air plus haut que si le tir était centré.



Une chaînette formée de segments métalliques articulés (a) ou de macaronis enfilés (b) se déverse en formant au-dessus du bocal une arche surélevée. L'effet ne se produit pas avec une chaînette moins rigide (c) ou une corde.



régime permanent. Les parties de la chaînette posées dans le bocal ou sur le sol sont entassées et ne présentent aucune tension; elles ne sont donc soumises qu'à leur poids, lequel est compensé par la réaction du support.

Pour la partie de la chaîne en mouvement, il paraît raisonnable de supposer qu'elle ne subit que son poids, qui tire et met en mouvement les segments initialement immobiles par l'intermédiaire de la tension, et la force de réaction du bord du bocal. Mais un calcul rapide montre alors que la chaîne ne saurait s'élever.

Pour interpréter l'expérience, il faut donc faire intervenir une poussée

supplémentaire, que seul le fond du récipient peut exercer. Mais par quel mécanisme?

LA RIGIDITÉ LOCALE JOUE UN RÔLE ESSENTIEL

Comme on peut aisément le vérifier, l'effet disparaît lorsqu'on utilise une corde ou un fil, qui restent appuyés sur le bord en se dévidant. On suspecte donc que la rigidité locale ou l'aspect composite de la chaîne jouent un rôle. Lequel?

Le physicien anglais John Biggins, de l'université de Cambridge, a vérifié que si l'on relie des billes de métal par des fils souples, aucune élévation ne se produit.

En revanche, si l'on enfle des pâtes de type macaronis le long d'un fil de nylon, l'expérience que chacun peut reproduire dans sa cuisine, l'effet subsiste, bien qu'il soit moins spectaculaire, sans doute parce que les pâtes n'ont pas l'élasticité, et donc la capacité de rebond, du métal. Cela nous incite à examiner de plus près l'effet de la rigidité des segments.

Une expérience *a priori* sans grand rapport a permis d'y voir plus clair. Il

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



l'agissait d'un défi lancé par le physicien Jim Pantaleone, de l'université de l'Alaska à Anchorage. Prenez une carabine (c'est facile aux États-Unis...), placez-la bien verticalement sous un bloc parallélépipédique de bois posé sur un support, et tirez une balle. Est-ce que la hauteur à laquelle s'élève le bloc dépend de la position de l'impact ?

Non, répondra-t-on rapidement. Il s'agit d'un choc mou (la balle reste logée dans le bloc) et juste après le choc, la quantité de mouvement de l'ensemble balle + bloc est égale à la quantité de mouvement initiale de la balle (celle du bloc étant initialement nulle). Cette loi fondamentale permet de calculer sans ambiguïté la vitesse de l'ensemble après l'arrêt de la balle et donc la hauteur qui sera atteinte. Cette prédiction est d'ailleurs parfaitement vérifiée lorsqu'on tire au centre du bloc, ou légèrement à côté.

En revanche, au-delà d'une certaine distance du centre, plus l'impact est décentré, plus le bloc monte haut ! Comment expliquer ce fait ?

UN COUPLE QUI PROPULSE

Lorsque la balle pénètre dans le bois, elle est ralentie et, en vertu de la loi de l'action et de la réaction, pousse sur le bloc jusqu'à ce qu'elle s'y immobilise. La force (variable) qui en résulte met en mouvement le bloc et, plus précisément, accélère son centre de masse. Mais simultanément, cette force exerce un couple qui fait tourner le bloc sur lui-même.

Si ce couple est faible, la rotation du bloc est suffisamment lente pour que la vitesse de l'arête du bloc située du côté opposé à l'impact et en contact avec le support soit verticale : le bloc décolle sans s'appuyer sur le support et monte à la hauteur donnée par la loi de conservation de la quantité de mouvement.

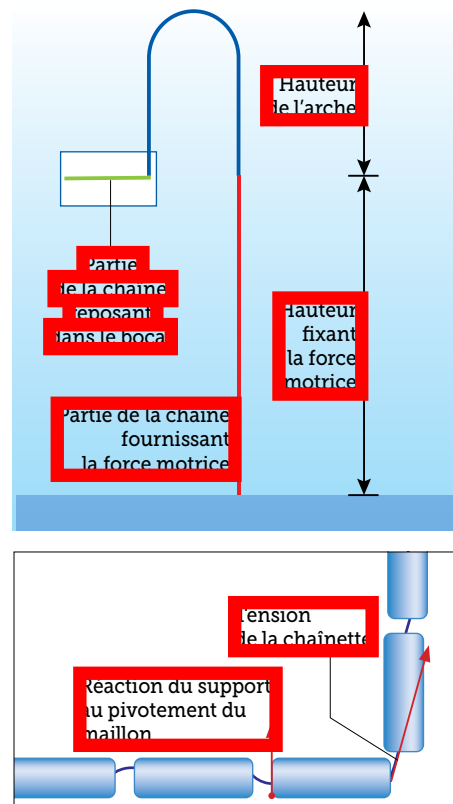
Au contraire, si le couple est important, la rotation induite est rapide et l'arête en question s'enfoncerait dans le support si celui-ci n'était rigide. En pratique, l'arête reste immobile et appuie fortement sur le support tandis que le bloc se met à pivoter autour de cette ligne de contact. Au cours de cette phase très brève, le bloc subit donc de la part du support une force importante, dirigée vers le haut, qui s'ajoute à la force due à l'impact de la balle.

Comme l'angle de rotation du bloc lors de cette phase est faible, les forces qui agissent sont presque verticales. Il s'ensuit que l'accélération du centre de masse est plus importante et le bloc monte donc plus haut qu'avec un impact

LA PROPULSION D'UN MAILLON

Le même effet qui produit un supplément de poussée pour un bloc posé sur un support (voir l'encadré de la page précédente) est à l'œuvre dans le phénomène de la chaîne-fontaine, où une chaînette semi-rigide se déverse hors d'un bocal. La principale force qui agit ici est la tension de la chaîne, due au poids de la partie suspendue entre le bocal et le sol (en rouge sur le schéma ci-contre). Cette tension est transmise jusqu'au premier segment ou maillon posé horizontalement dans le bocal.

Ce maillon subit donc une force quasi verticale au niveau de son extrémité droite. Cela le fait pivoter, d'où une poussée supplémentaire vers le haut due à la réaction du support au niveau de son extrémité gauche.



de balle centré. Dans le cas d'un bloc peu épais, cette situation survient dès que l'on décentre le tir de plus de un sixième de la longueur de la pièce de bois.

Quel est le rapport avec la chaîne-fontaine ? Les deux ingrédients nécessaires à l'effet précédent, une force initiale décentrée et une rigidité suffisante pour assurer la rotation en bloc du solide posé, sont justement présents au niveau des segments de la chaînette.

C'est particulièrement flagrant avec la chaîne de macaronis : lorsqu'un segment s'apprête à quitter le fond du récipient, il subit à son extrémité, de la part du segment précédent, une force quasi verticale égale à la tension de la chaîne. Sa rotation, due au couple exercé, est entravée par le support, d'où une force supplémentaire qui agit sur son autre extrémité. Le segment acquiert donc une accélération et une vitesse supérieures à celles qu'il aurait acquises sous l'effet de la seule tension de la chaîne. Celle-ci peut ainsi s'élever et donner l'illusion d'une fontaine d'un nouveau genre.

Il existe d'autres phénomènes apparentés. Par exemple, une chaîne qui tombe sur une table verra sa vitesse de chute augmenter, et si l'on tire rapidement sur une chaîne à plat, une partie se redressera et présentera une ondulation caractéristique. Nos lecteurs en dénicheront-ils d'autres ? ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Pantaleone et R. Smith, **A bullet-block experiment that explains the chain fountain**, *The Physics Teacher*, vol. 56, pp. 294-297. 2018.

J. Pantaleone, **A quantitative analysis of the chain fountain**, *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 414-421. 2017.

J. S. Biggins, **Growth and shape of a chain fountain**, *Europhysics Letters*, vol. 106, article 44001. 2014.

La vidéo de Steve Mould : <https://www.youtube.com/watch?v=dQJBBklnQQ>

L'Anthropocène: une urgence, un défi !

L'Anthropocène
décodé pour
les humains
N. Wallenhorst



Nathanaël Wallenhorst - 204 p. - 16€

Un ouvrage
pour comprendre
cette nouvelle ère,
qui pourrait voir tout
basculer.

Où en est notre planète?
Et comment agir –
cette fois dans le bon
sens !?

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



MAINTIEN



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

POURQUOI LES ZÈBRES SONT-ILS ZÉBRÉS ?

Depuis Charles Darwin et Alfred Wallace, les biologistes de l'évolution s'interrogent sur l'éventuel avantage sélectif que les rayures apportent aux zèbres. Un siècle et demi plus tard et après dix-huit hypothèses, la solution semble en vue.

En 1871, dans *La Filiation de l'homme*, Charles Darwin s'étonne : «Le zèbre est rayé d'une manière qui le rend très visible, et ses rayures ne lui apportent aucune protection dans les plaines ouvertes de l'Afrique du Sud...». Plus tard, dans *Selection and Tropical Nature*, le naturaliste Alfred Wallace s'interroge : «Il est quelque peu hâtif de déclarer que les rayures ne fournissent aucune protection.» Certes, mais laquelle ? Les hypothèses fusent. On peut les rassembler suivant cinq catégories : diminuer la prédation (camouflage, confusion visuelle...); servir de motif coloré d'avertissement, car les zèbres peuvent mordre; faciliter les interactions sociales; contrarier les attaques des mouches hématophages (taons, mouches tsé-tsé...); réguler la température corporelle. Ces dernières années, l'équipe de Tim Caro, à l'université de Californie à Davis, et celle de Gábor Horváth, à l'université de Budapest, se sont consacrées à éliminer la quasi-totalité de ces hypothèses par le jeu d'expériences subtilement montées.

Une hypothèse clé à tester était le rôle visuel des zébrures contre les prédateurs.

Pour cela, les zèbres devaient être vus non par des yeux humains, mais par ceux de leurs prédateurs. C'est ainsi qu'en 2015, Tim Caro et ses collègues ont traité les images prises sur le terrain, en Tanzanie, en utilisant des filtres qui simulent l'apparence des zèbres pour des lions ou des hyènes tachetées. Ils ont constaté alors qu'au-delà de 50 mètres le jour, de 30 mètres en pénombre et de 9 mètres par nuit sans lune, ces prédateurs ne détectent plus les rayures, contrairement à la vision humaine. Or, à ces distances, ils sentent et entendent les zèbres, ce qui tend à prouver que les zébrures ne procurent aucun camouflage. Par une démarche analogue, l'équipe a de même éliminé l'hypothèse de la couleur d'avertissement en plaine.

En 2018, l'équipe de Gábor Horváth a de son côté éliminé l'hypothèse de la thermorégulation en montrant que la température moyenne d'équidés ou de bovins reste à peu près la même, que l'animal soit blanc, noir, gris, marron ou zébré. Enfin, une étude comparée du comportement social et de la cognition chez les chevaux et les zèbres a permis d'affirmer que les rayures ne jouent aucun rôle dans la reconnaissance des individus entre eux.



Cette espèce est en danger. Le nombre d'individus a diminué de 54 % en 30 ans, passant de 5 800 à la fin des années 1980 à 2 680 actuellement.



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

En 1882, Menelik II, alors roi du Shewa, en Éthiopie, offrit un zèbre à Jules Grévy, président de la République française. Confié à la ménagerie du Jardin des Plantes, il fut identifié par le zoologue Émile Oustalet comme une espèce inconnue et reçut le nom du président.

EN CHIFFRES

1,9 mètre

Le zèbre de Grévy est le plus grand des zèbres.

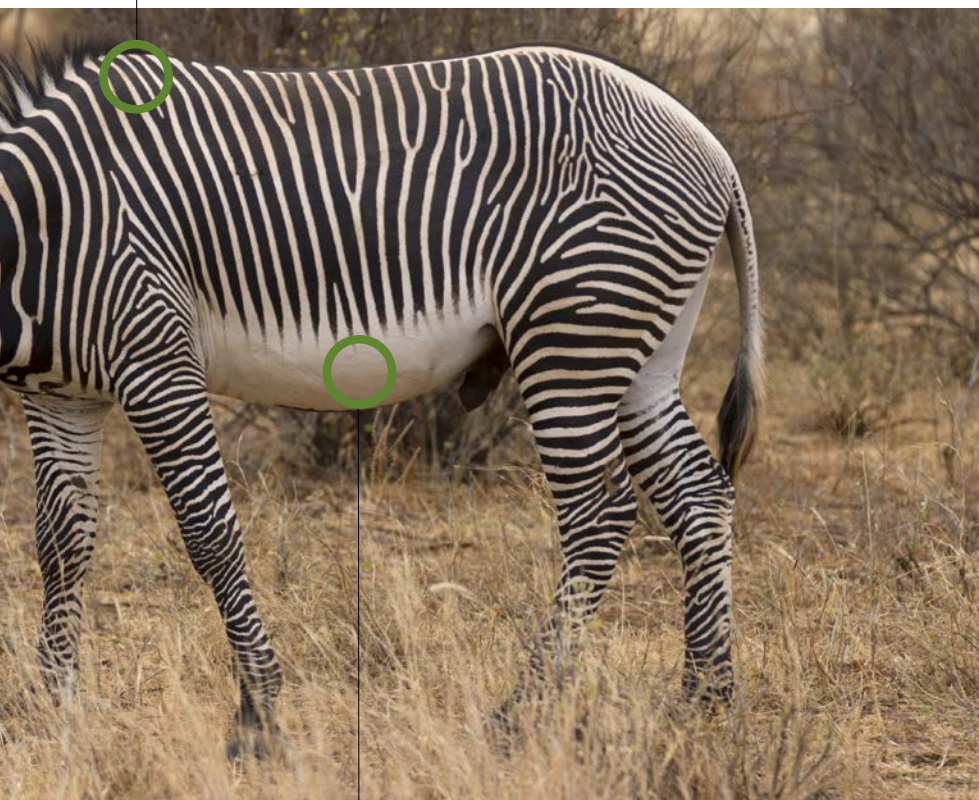
Les mâles mesurent jusqu'à 1,9 mètre de hauteur au garrot (3 mètres de la tête à la queue) et pèsent jusqu'à 450 kilogrammes.

80

C'est le nombre moyen de rayures du zèbre de Grévy. Il a les rayures les plus fines de tous les zèbres : les bandes noires, de largeur comprise entre 25 et 38 millimètres, sont espacées de 20 millimètres.

3

On connaît 3 espèces de zèbres : le zèbre de montagne *Equus zebra* avec 2 sous-espèces (*E. z. hartmannae* et *E. z. zebra*), le zèbre de plaine ou zèbre de Burchell, *Equus quagga*, avec 6 sous-espèces (le quagga éteint *E. q. quagga*, *E. q. burchellii*, *E. q. boehmi*, *E. q. borensis*, *E. q. chapmani* et *E. q. crawshayi*) et le zèbre de Grévy, *Equus grevyi*, qui vit dans les régions arides du sud de l'Éthiopie et du nord du Kenya.



Les zèbres de Grévy s'éloignent parfois de plus de 35 kilomètres d'un point d'eau à la recherche de nourriture, même durant la saison sèche.



Zèbre de Grévy (*Equus grevyi*)
Taille : 1,45 à 1,90 m (mâle)
Poids : 350 à 450 kg (mâle)

Restait une hypothèse : les mouches ! Dès 1981, Jonathan Waage, de l'université Brown, aux États-Unis, remarquant que le territoire du zèbre de Burchell, une sous-espèce du zèbre de plaine, coïncide avec celui des mouches tsé-tsé, ou glossines, avait l'hypothèse que les zébrures détournent ces dernières. Il a alors construit des modèles rayés permettant de capturer les glossines et constaté que ceux en mouvement capturaient moins d'insectes que ceux restés au repos. En 1988, John Brady et William Shereni, de l'université de Londres, ont repris ces pièges et montré que les glossines et les taons se posaient sur des leurres dont les rayures étaient larges, évitant ceux à rayures étroites.

En 2014, Tim Caro effectue à nouveau ces études en les raffinant. Tout d'abord, il mesure avec précision la largeur des rayures des animaux. Celle-ci varie

suivant les espèces de zèbres, mais aussi suivant la situation des rayures sur le corps. Les plus étroites se situent sur la face (1,2 centimètre en moyenne) et sur les pattes (1,35 centimètre en moyenne), les plus larges, sur la croupe (3,9 centimètres en moyenne). Or même les rayures les plus larges tombent dans la gamme de taille que les glossines évitent.

LA PISTE DES MOUCHES

Parallèlement, Tim Caro reprend la comparaison des territoires des zèbres et des mouches hématophages que Jonathan Waage avait entreprise. Il ne se contente pas d'étudier les glossines et rajoute les nombreuses espèces de taons d'Afrique. En effet, si les glossines sont connues pour transmettre, lors de leur piqûre, un parasite responsable de la maladie du sommeil – un trypanosome –, les taons sont aussi très actifs. Ils transmettent notamment le rhume équin, la maladie africaine du cheval, l'anémie infectieuse équine et d'autres trypanosomiasés. Toutes ces maladies graves deviennent vite fatales pour les zèbres, beaucoup plus que pour les autres ongulés. Par conséquent, on peut penser que tout mécanisme de protection contre ces mouches apparaissant chez des individus serait alors très vite sélectionné au fil de l'évolution.

De plus, il ne suffit pas de considérer les maladies que les insectes transmettent. Il faut aussi tenir compte de la perte de sang subie par les animaux après de

nombreuses attaques. Ainsi, des mesures réalisées sur des bovins aux États-Unis ont état de pertes de l'ordre d'un demi-litre de sang par jour lorsque les taons sont nombreux. Tim Caro constate alors que l'ensemble des territoires des glossines et des taons recouvrent ceux des différentes espèces de zèbres. Qui plus est, les seuls zèbres pas ou peu rayés, les quaggas, aujourd'hui disparus, vivaient là où ces insectes hématophages étaient absents.

UNE QUESTION DE POLARISATION

Les insectes hématophages apparaissent donc comme le facteur sélectif majeur pour l'évolution des zébrures. Mais par quel mécanisme les zébrures protégeraient-elles de ces mouches? Tim Caro élimine la piste de l'épaisseur de la fourrure. Pour les trois espèces de zèbres, celle-ci ne dépasse pas 2 millimètres, alors qu'elle est de 8 millimètres pour le cheval de Przewalski ou 13 millimètres pour l'antilope sing-sing, sachant que les trompes des glossines et des taons mesurent environ 4 millimètres. La couleur est donc bien le facteur déterminant.

Or les insectes sont capables de détecter la lumière polarisée, car dans leurs cellules visuelles, les molécules photoréceptrices ont toutes la même orientation, à la différence des cônes et des bâtonnets de la rétine des mammifères, où l'orientation de ces molécules est aléatoire. En 2012, Gábor Horváth réalise donc des expériences sur des modèles de zèbre en tenant compte de la polarisation de la lumière réfléchie par leur parure (et en vérifiant qu'elle est similaire à celle de la lumière réfléchie par de vrais zèbres).

Il montre que l'attractivité des modèles dépend du degré de polarisation de la lumière qu'ils réfléchissent: un modèle uni noir ou brun, qui réfléchit une lumière très polarisée linéairement, attire les mouches; un modèle blanc, qui réfléchit une lumière peu polarisée, les attire peu. Et un modèle zébré les attire d'autant moins que la largeur de ses zébrures est faible. Or plus les zébrures sont étroites et moins la lumière globalement réfléchie par les bandes noires et blanches est polarisée. Par ailleurs, le résultat est similaire avec un modèle uniformément gris ayant les zébrures polarisées, signe que c'est bien le degré de polarisation de la parure qui influe sur les mouches. Le mystère des zèbres semble donc résolu! Pas si simple: Tim Caro ne réussit pas à trouver des résultats similaires sur le terrain.

Mais une autre approche originale s'est fait jour. Les zébrures pourraient jouer le

L'ILLUSION DU ZEBRE

Quand un zèbre se déplace vite, les zébrures donnent l'impression que sa partie antérieure se déplace vers le haut.

Andis que sa partie antérieure se déplace vers l'arrière, comme si l'animal se désagrégeait. L'illusion d'optique est encore plus forte lorsqu'un groupe de zèbres avance, comme ci-contre. Les couleurs indiquent les directions de déplacement que l'on perçoit du fait de cette illusion d'optique: si certaines parties des animaux vont bien vers l'avant (en rouge), d'autres semblent partir vers l'arrière (en vert) ou vers le haut (en ocre). De quoi désorienter les mouches! Voir les prédateurs.



Sens de déplacement du groupe

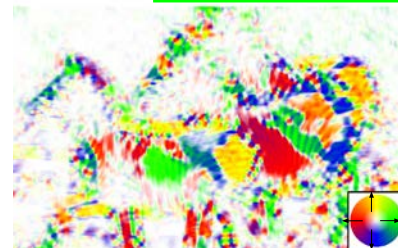


Image perçue par les insectes

ôle d'un camouflage dynamique, c'est-à-dire quand l'animal est en mouvement. Tout le monde connaît l'illusion d'optique que l'on a au cinéma, quand on voit tourner une roue de carrosse «à l'envers». Elle s'explique par le nombre d'images à la seconde et par la persistance visuelle. Une autre illusion d'optique célèbre est l'enseigne des barbiers, courante aux États-Unis et dans d'autres pays anglo-saxons: un poteau recouvert de bandes bleue, blanche et rouge disposées en hélice. Lorsque le poteau tourne, on a l'impression qu'il se déplace vers le haut.

En 2014, Martin How et Johannes Zanker, neurophysiologistes respectivement à l'université du Queensland (Australie) et à l'université de Londres, ont réalisé un travail minutieux sur les zébrures. Les flancs d'un zèbre de plaine portent dans sa partie antérieure des raies verticales, tandis que celles de la partie postérieure sont approximativement inclinées à 45 degrés. Pour Martin How et Johannes Zanker, les zébrures antérieures minimisent l'illusion de la roue, les postérieures, celle de l'enseigne de barbier, lorsque le déplacement est rapide (voir l'encadré ci-dessus). L'insecte qui s'approche de l'animal «voit» l'avant de l'animal se déplacer vers l'arrière et la partie postérieure aller vers le haut, comme si le zèbre se cassait en morceaux. C'est également sans doute vrai pour un lion, en situation rapprochée, qui est prêt à sauter sur sa proie. Polarisation? Illusion d'optique? Les explications ne sont pas antagoniques, mais le problème semble encore garder quelque secret...

BIBLIOGRAPHIE

G. Horváth et al., **Experimental evidence that stripes do not cool zebras**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 9351. 2018.

A. Melin et al., **Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans**, *PLoS One*, vol. 11(3), article 0151660. 2016.

T. Caro et al., **The function of zebra stripes**, *Nature Communications*, vol. 5, article 3535. 2014.

M. J. How et J. M. Zanker, **Motion camouflage induced by zebra stripes**, *Zoology*, vol. 117, pp. 163-170. 2014.

A. Egri et al., **Polarotactic abanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes**, *J. exp. Biol.*, vol. 215, pp. 736-745. 2012.

**DURÉE
LIBRE**

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

☒

DUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique

☒

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

☐

FORMULE DÉCOUVERTE

12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %
DPV4E90

☐

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier

5,50€
PAR MOIS
-31 %
DPV6E50

☐

FORMULE INTÉGRALE

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne

3,20€
PAR MOIS
-43 %
IPV8E20

☒

Mes coordonnées

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Tél. : _____

E-mail : _____ @ _____

(indispensable pour la formule intégrale)

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

☒

Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

BAN _____

Numéro d'identification international du compte bancaire _____

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature _____

Organisme Créancier : Pour la Science
70 bis, bd du Montparnasse - 75014 Paris

☒

Merci de joindre impérativement à votre mandat

Remarque : Si vous souhaitez annuler votre abonnement, vous devez nous en faire part avant le 15 du mois suivant la date de votre dernier prélèvement.

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

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

MAUVAIS



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

EXTRAIRE DU VIN LES MAUVAIS GOÛTS

Dans le commerce, ajouter des composés à un vin est interdit.
Mais peut-on en retrancher pour éliminer des goûts indésirables?
Des chimistes ont en tout cas montré que c'est possible.

Les produits alimentaires doivent être sains, marchands et loyaux! Du vin, c'est du vin, et cela s'obtient par la fermentation du jus de raisin. Bien sûr, il est facile de faire macérer des herbes, d'ajouter des composés odorants, mais la boisson obtenue ne doit plus être nommée vin.

Cela étant, certains vins sont sans grand intérêt. Pourquoi ne pourrait-on pas chercher à les améliorer? Tant qu'on n'en fait pas commerce, quel mal y a-t-il à réveiller un petit vin d'un soupçon de porto ou de liqueur de cassis? En cuisine, on ajoute bien des aromates ou des épices! Toutefois, si l'on sait parfaitement reproduire des breuvages qui ressemblent à du vin au point que des amateurs éclairés s'y trompent, et si les meilleurs des parfumeurs savent reproduire les bouquets des plus grands vins, la loyauté nous oblige à prévenir le consommateur: ces boissons ne sont pas les «vins».

Au début du siècle, on faisait passer du vin rouge sur du charbon pour qu'il devienne blanc. Le procédé servait aussi à redonner un goût admissible à des produits rances. Cette pratique est grossière: les molécules odorantes sont captées sans spécificité. Bentonite, copeaux de chêne, désodorisés ou non, ne sont pas plus spécifiques. Aussi Chen Liang, de l'université d'Adelaide, en Australie, et deux collègues ont-ils testé un moyen d'aller pêcher spécifiquement des composés odorants dans les liquides (*J. Agric. Food Chem.*, vol. 66, pp. 10086-10096, 2018).

Quand on a connu le trichloroanisole, qui donne le goût de bouchon aux vins, on s'est mis à rêver de procédés qui extraient ce composé spécifiquement, sans

Des pyrazines, parfois dues à la présence de coccinelles dans la vigne, peuvent donner un goût indésirable au vin.



nuire au reste du produit. Depuis quelques années, s'introduit la pratique de faire couler le vin bouchonné sur des feuilles de plastique transparent, notamment de polyacide lactique... Mais là encore, la spécificité chimique est faible, d'autant que le goût de bouchon n'est pas toujours dû au trichloroanisole. En outre, les plastiques dénaturent le goût des aliments.

Les «polymères à empreinte moléculaire» (MIP) semblent plus prometteurs. Lors de la synthèse de ces nouveaux matériaux, on les met en contact avec les molécules que l'on veut extraire. On crée ainsi des sites spécifiques de liaison, déjà utilisés en immunologie, en chimie analytique ou en biochimie. Mieux, on peut ajouter, toujours lors de la synthèse, des nanoparticules aimantées, de façon à obtenir des poudres que l'on verse dans des solutions, avant de les récupérer au moyen d'aimants.

Chen Liang et ses collègues ont testé la méthode pour les alkylméthoxy-pyrazines, des composés qui donnent une note herbacée aux vins et font disparaître les notes fruitées ou florales. Ces pyrazines proviennent de la vigne ou de la présence de coccinelles. Notamment, la 3-isobutyl-2-méthoxy-pyrazine donne un goût de poivron vert dès que sa concentration atteint 10 nanogrammes par litre de vin.

Avec les MIP magnétiques utilisés avant ou après la fermentation, les résultats sont bien supérieurs à ceux des méthodes précédentes. Les dégustateurs ont perçu la modification de quatre notes odorantes pour tous les traitements (poivron, vert frais, herbacé et solvant). Certains composés odorants ne sont pas modifiés par les MIP, mais la concentration des pyrazines passe au-dessous de leur seuil de perception.

Nous sommes sur la bonne voie, sans avoir encore la canne à pêche moléculaire parfaite. Reste la question de la loyauté: un vin ainsi modifié conservera-t-il le privilège de se nommer «vin»? ■



MAUVAIS

Cette boisson d'hiver est artificielle, mais les dégustateurs novices la confondent avec un vin de Noël.

- 1 Diluer quatre fois de la vodka.
- 2 Ajouter des composés phénoliques en vente sur Internet.
- 3 Ajouter une pointe de couteau de glycérol (ou glycérine), une pincée d'acide tartrique et une pincée de sel.
- 4 Ajouter quelques grammes de sucre par litre.
- 5 Ajouter une goutte de vanille liquide et de la cannelle.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 495 (jan. 19)
réf. PI.495



N° 494 (déc. 18)
réf. PI.494



N° 493 (nov. 18)
réf. PI.493



N° 492 (oct. 18)
réf. PI.492



N° 491 (sept. 18)
réf. PI.491



N° 490 (août 18)
réf. PI.490



N° 489 (juillet 18)
réf. PI.489



N° 488 (juin 18)
réf. PI.488



N° 487 (mai 18)
réf. PI.487



N° 486 (avril 18)
réf. PI.486



N° 485 (mars 18)
réf. PI.485



N° 484 (févr. 18)
réf. PI.484

À retourner accompagné de votre règlement à :

Boutique Pour la Science - Service VPC - 19 rue de l'Industrie - BP 90055 - 67402 Illkirch Cedex - email: boutiquescience@lapresse.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9.90 €.

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

1 ^{re} réf.		2 ^e	9.90 € =	2,90	€
2 ^e réf.			9.90 € =		€
3 ^e réf.			9.90 € =		€
4 ^e réf.			9.90 € =		€
5 ^e réf.			9.90 € =		€
6 ^e réf.			9.90 € =		€

TOTAL À REGLER _____ €

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Taxes 14 - Sarl au capital de 32000 € - RCS Paris B.311.797.393 - Siret: 311.797.393.000.23 - APE 5814

Notre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique pour la science.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls> conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par email à l'adresse: protection-donnees@pourlascience.fr

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Téléphone

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°

Date d'expiration

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMEROS SUR

BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.56

MIXOTROPHIE

Cette stratégie consiste à la fois à se nourrir d'autres organismes comme un animal et à utiliser la photosynthèse comme une plante.

On ne connaît que quelques rares exemples de mixotrophes terrestres, telle la dionée attrape-mouche, une plante carnivore. Ils sont en revanche beaucoup plus nombreux qu'on ne le pensait parmi le plancton marin.

P.66

MACSJ1149-JD1

Cette galaxie a été observée telle qu'elle était quand l'Univers était âgé de 550 millions d'années. C'est l'une des plus lointaines de l'univers, et donc des plus anciennes que l'on connaisse.

P.26

« L'histoire sociale des OGM nous projette dans une version éprouvante du film Un jour sans fin. À chaque coup d'éclat médiatique, la suspicion du public se renouvelle, voire se renforce »

VIRGINIE FOURNAU
Zoologiste à Sciences Po, à Paris

P.16

241

C'est le nombre de sources d'ammoniac localisées (moins de 50 kilomètres de diamètre) répertoriées dans le monde à l'aide de mesures par satellite. Il s'agit de 83 sites d'agriculture intensive et de 158 sites industriels.

P.96

VIN CHARBONNÉ

Au début du ^{xx}e siècle, on faisait passer du vin rouge sur du charbon pour qu'il devienne blanc. Le procédé servait aussi à redonner un goût acceptable à des produits rances en captant ses molécules odorantes.

P.92

ZÈBRE DE GRÉVY

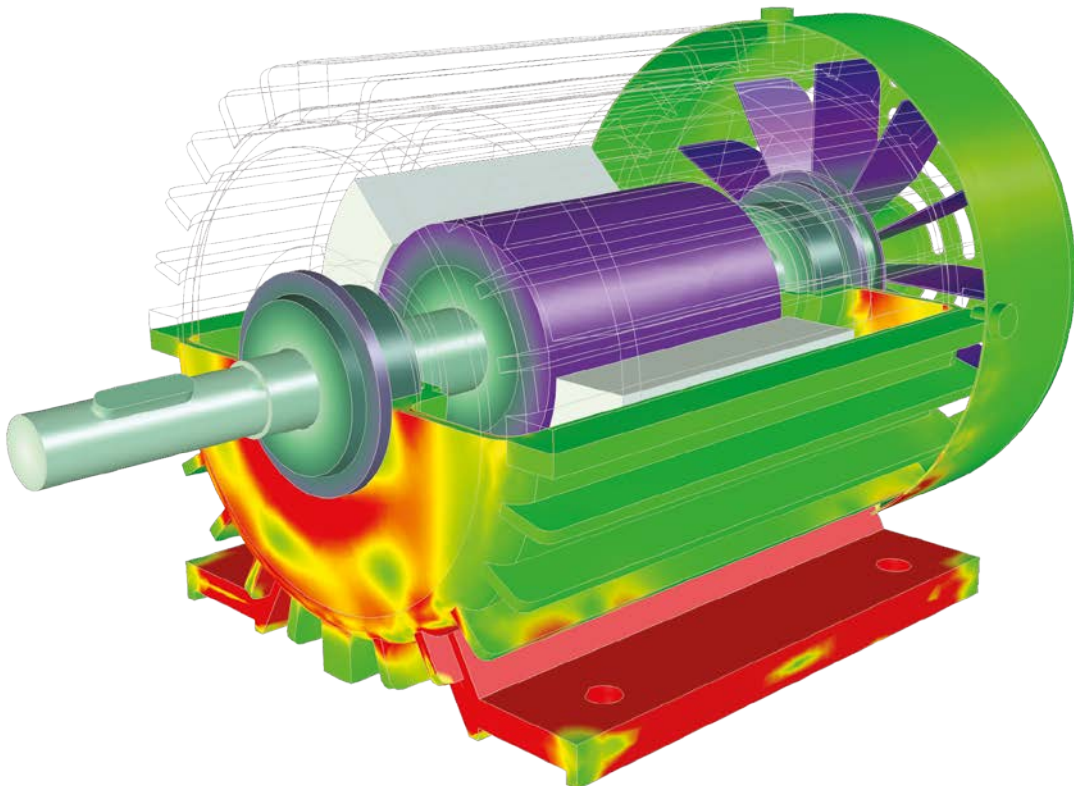
En 1882, Menelik II, alors roi du Shewa, en Éthiopie, offrit un zèbre à Jules Grévy, président de la République française. Confiné à la ménagerie du Jardin des Plantes, l'animal fut identifié par le zoologue Émile Oustalet comme une espèce inconnue et reçut le nom du président.

P.42

L'ARC

Il semble qu'il existait dès le début de l'Azilien, il y a quelque 14 000 ans. À cette époque, la toundra qui recouvrait l'Europe s'est muée en forêt. Ses habitants, qui chassaient auparavant à l'aide de sagaies aux pointes en bois de renne, ont opté pour de petites pointes en silex, bien plus faciles à remplacer en cas de perte.

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



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

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

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

comsol.blog/induction-motor

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses