

POUR LA

Édition française de Scientific American

SCIENCE

POUR LA SCIENCE

PHYSIQUE

L'ANTIMATIÈRE

**TOMBE-T-ELLE VERS
LE HAUT ?**

CLIMATOLOGIE

CAPTER LE CO₂

**POUR SAUVER
LE CLIMAT**

MATHÉMATIQUES

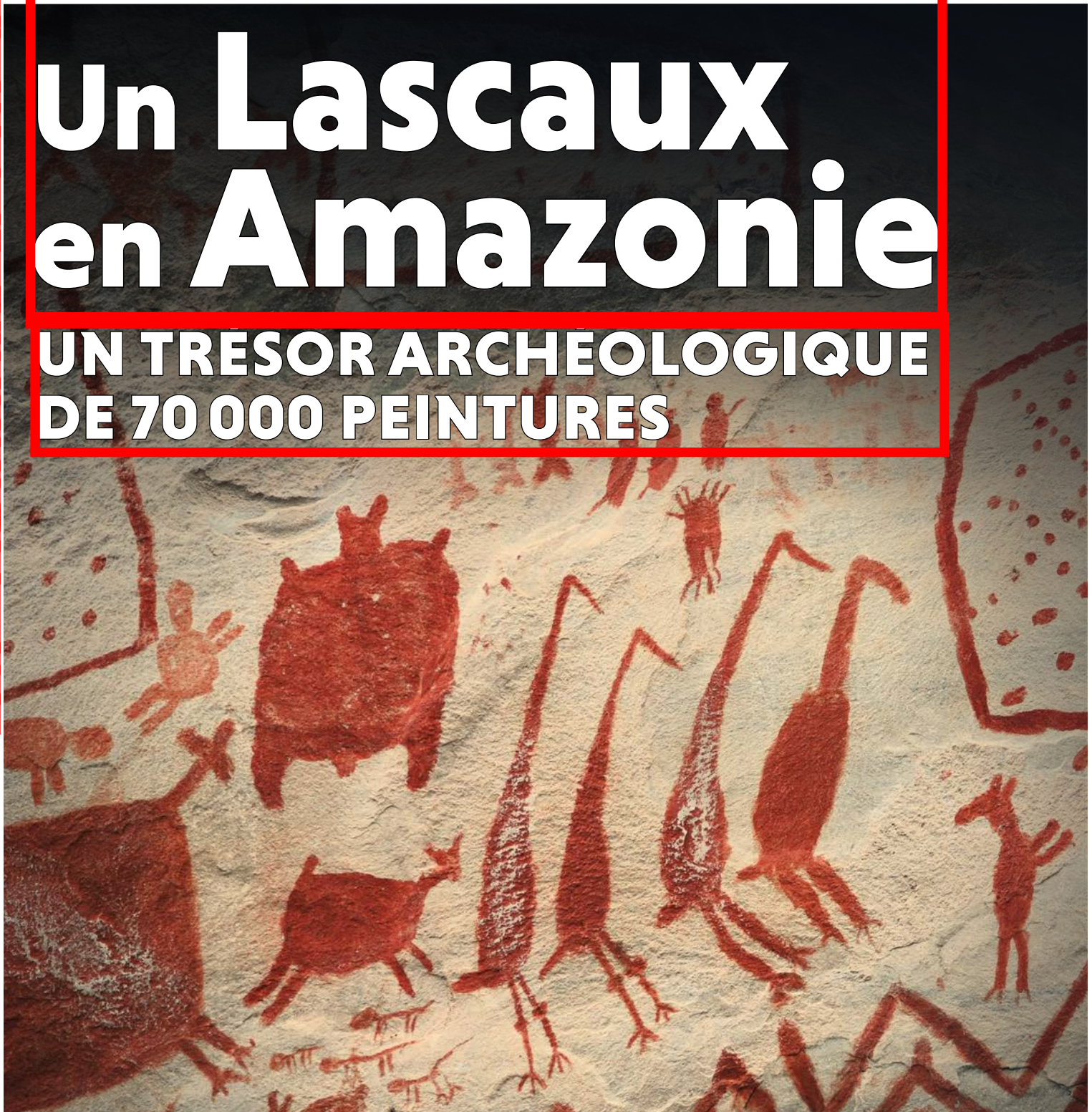
LA FRANCE

**EST UN CARRÉ,
PAS UN HEXAGONE !**

AVRIL 2019
N° 498

Un Lascaux en Amazonie

**UN TRÉSOR ARCHEOLOGIQUE
DE 70 000 PEINTURES**



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

POUR LA
SCIENCE

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 Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SERIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Manent

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

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy, Patrick Cocu

Revisseuse: Anne-Rozenn Joubert

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:

Olivier Boucher, Nobuaki Fuji, Jérôme Hilaire,

Séverine Lemaire-Duparcq, Caroline Muller,

Christophe Pichon, Elizabeth Reichel-Dolmatoff,

Symar de Rugy, Bruno Secordel, Claudia Stubenrauch,

Bernard Valeur, Marie Vidailhet

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
monophone, 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

Papier à fibres recyclées: 30 %

Eutrophisation ou « Impact

sur l'eau »: P... 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

**É
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

UN TRÉSOR RUPESTRE DANS LE NOUVEAU MONDE

Chiribiquete. Ce nom, qui sonne en français comme un sobriquet affectueux, deviendra-t-il aussi célèbre que Lascaux, cette grotte découverte en 1940 dans le Sud-Ouest de la France et ornée de magnifiques peintures préhistoriques? Chiribiquete, mais aussi la Lindosa, deux sites en pleine forêt amazonienne en Colombie, en ont en tout cas le potentiel: des dizaines de milliers d'années, des parois rocheuses de plateaux s'élevant au-dessus de la jungle et offrent un spectacle saisissant aux visiteurs. Motifs géométriques, figures d'aspect humain, animaux stylisés, êtres hybrides et autres représentations énigmatiques recouvrent avec une grande densité d'immenses surfaces.

Ce spectacle, nous vous proposons dans ce numéro de le partager en compagnie de Stéphane Rostain, archéologue au CNRS et spécialiste de l'Amazonie (voir pages 24 à 35). Au-delà des images et de la beauté picturale, on comprendra l'importance scientifique de ces deux sites archéologiques et les interrogations qu'ils suscitent, ainsi que l'histoire de leur émergence dans la conscience collective.

En fait, Chiribiquete et la Lindosa sont des redécouvertes: ces deux endroits et leurs peintures rupestres ont été vus par des explorateurs occidentaux dès les années 1940. Mais le caractère très ancien des œuvres avait échappé aux premiers observateurs et ne s'est révélé que bien plus tard. Entre-temps, la guerre civile en Colombie, entre le gouvernement et les Farc, auxquels s'ajoutaient les narcotrafiquants, a empêché les chercheurs durant plusieurs décennies d'accéder à ces endroits et de les étudier. La paix conclue en 2016 a enfin ouvert la voie aux travaux scientifiques sur Chiribiquete et la Lindosa. Un exemple de plus qui montre que la guerre et la science ne font pas toujours bon ménage. ■

S

SOMMAIRE

N° 498 /
Avril 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

Des matériaux topologiques
pas si rares
Véhicules électriques
Les batteries en Europe
Des nuages en voie
d'extinction
Il y a 2,1 milliards d'années,
la vie bougeait déjà
Des montagnes
sous nos pieds
Des cellules reprogrammées
pour combattre le diabète
Les abeilles, fortes en maths

P. 16

LES ÉLÉMENTS DU MOI

P. 18

AGENCE

P. 20

HOMO SAPIENS INFORMATICS

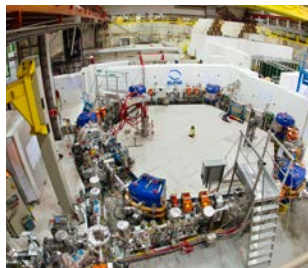
Plus de technique,
moins d'accidents?
Gilles Dowek

P. 22

QUESTIONS DE CONFIANCE

Ambiguïtés identitaires
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



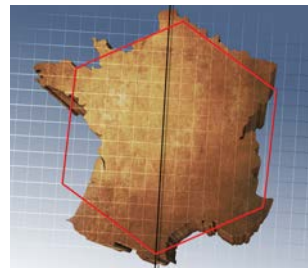
P. 36

PHYSIQUE DES PARTICULES

L'ANTIMATIÈRE TOMBE-T-ELLE VERS LE HAUT?

Gabriel Chardin

Et si l'antimatière était de
masse négative? En faisant
cette hypothèse, il est
possible de construire un
modèle cosmologique qui n'a
besoin ni de matière noire, ni
d'énergie noire, ni d'inflation.
Une hypothèse osée que les
physiciens pourraient bientôt
tester au Cern.



P. 52

MATHÉMATIQUES

AUX QUATRE COINS DE L'HEXAGONE

K. Zimmermann, F. Rodolphe,
T. Zharinova-Zimmermann
et J. Pothier

Quel est le polygone régulier
qui représente le mieux
la carte de la France
métropolitaine et
continentale? Des calculs
simples d'optimisation
répondent à la question
et montrent que le surnom
l'«Hexagone» est plutôt
justifié.



P. 44

NEUROSCIENCE

RAGE: UN VIRUS POUR EXPLORER LE CERVEAU

Andrew J. Murray

Comment cartographier
les circuits neuronaux
et identifier leur fonction
avec une précision inégalée?
En utilisant le virus
de la rage!



P. 56

CLIMATOLOGIE

CAPTER LE CO₂ POUR SAUVER LE CLIMAT

Richard Conniff

Pour limiter le réchauffement
climatique à 1,5 °C, il faudra
probablement retirer
de l'atmosphère quelque
1 000 milliards de tonnes
de dioxyde de carbone d'ici
à 2100. Dans quelle mesure
est-ce possible?



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

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

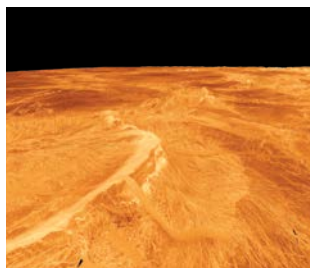
Notre sélection d'articles
Des offres préférentielles
Nos autres magazines
en kiosque



inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Stéphen Rostain
Les portraits des contributeurs
ont été de Seb Jarnot



P. 66

ASTROPHYSIQUE

VÉNUS : POURQUOI EST-ELLE SI DIFFÉRENTE DE LA TERRE ?

M. D. Dyar, S. E. Smrekar
et S. R. Kane

Alors que Vénus est née dans des conditions similaires à celles de la Terre, elle a évolué très différemment. Cette planète offre cependant un éclairage unique sur les débuts de la tectonique des plaques terrestre ainsi que sur les chances d'apparition de la vie ailleurs dans l'Univers.



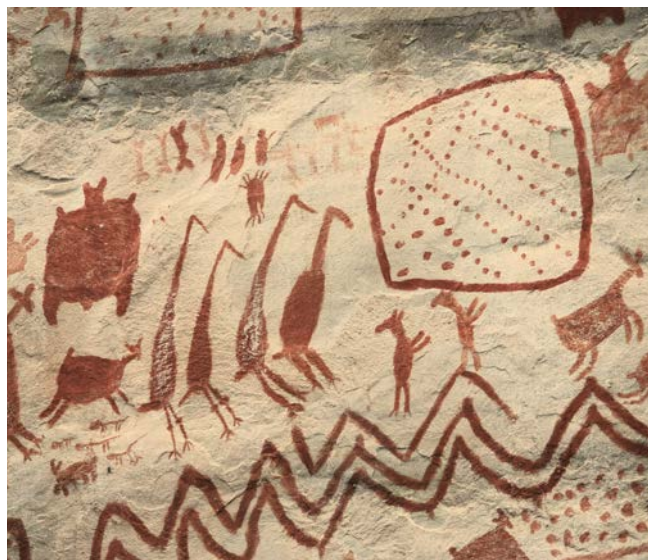
P. 74

HISTOIRE DES SCIENCES

DANS LES JARDINS CHIMIQUES DE STÉPHANE LEDUC

Raphaël Clément

Et si la physique et la chimie suffisaient à expliquer les formes du vivant ? Tombée dans l'oubli, cette idée défendue par le médecin Stéphane Leduc dans les années 1910 revient en force



P. 24

PRÉHISTOIRE

UN LASCAUX EN AMAZONIE

SCIENCE & SOCIÉTÉ

Des dizaines de milliers de peintures rupestres ornent les parois de deux sites perdus dans la forêt colombienne

A cause de la guerre civile, ce trésor archéologique probablement vieux de 12 000 ans est longtemps resté méconnu du public comme des chercheurs. Son étude scientifique commence enfin.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

LE POTENTIEL DANGER DES INTELLIGENCES SURHUMAINES

Jean-Paul Delahave

Entre l'idée de superintelligences menaçantes et celle, plus sympathique, de machines qui ne seraient que notre prolongement, laquelle est la plus vraisemblable ?

P. 86

ART & SCIENCE

Alangui sur un champignon

Loïc Mangin



P. 88

DÉES DE PHYSIQUE

Rouler sans être secouru

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

La rose dévoile son génome

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

La couleur des limonades

Hervé This

P. 98

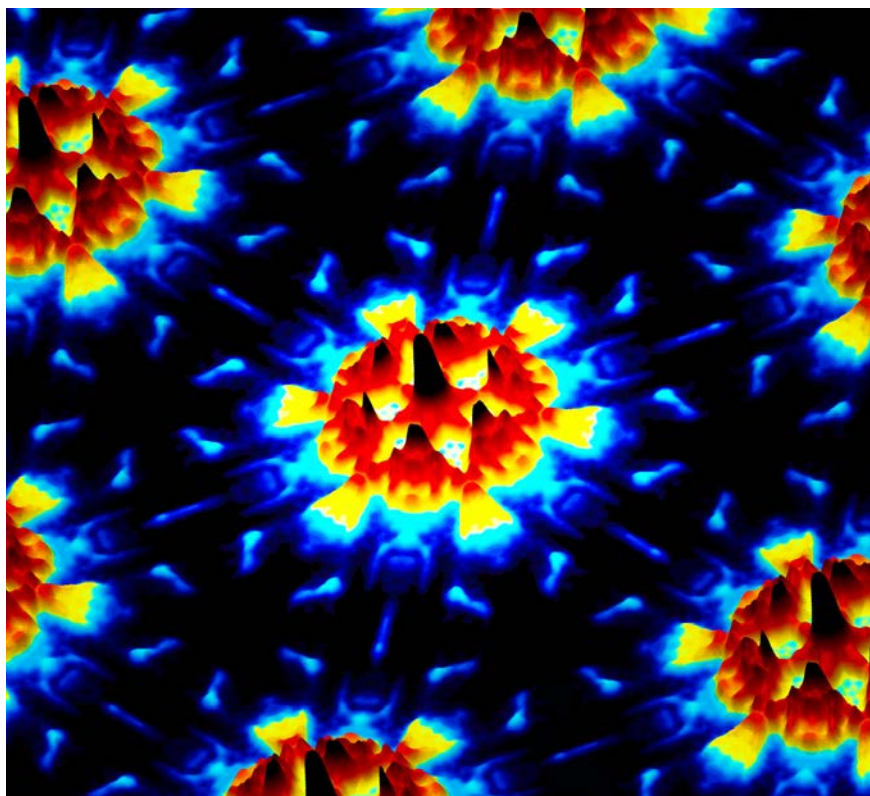
ÉPIQUEUR

PHYSIQUE

DES MATÉRIAUX TOPOLOGIQUES PAS SI RARES

ACTUALITÉS

- 2. 6 Echos des labos
- 2. 16 Livres du mois
- 2. 18 Agenda
- 2. 20 Homo sapiens informaticus
- 2. 22 Questions de confiance



Dans ce matériau à base de bismuth, le comportement des électrons, illustré par ce motif, est typique d'un isolant topologique.

Seule une centaine de ces matériaux aux propriétés exotiques étaient connus. Grâce à deux analyses systématiques, ce nombre pourrait être porté à plusieurs milliers. Une révolution !

Au début du ^{xx}e siècle, les physiciens ont découvert des matériaux aux propriétés très exotiques, nommés matériaux topologiques. Deux équipes, dont l'une menée par Andrei Regnault (CNRS, Université de Bordeaux), à laquelle a participé Nicolas Regnault, chercheur CNRS à l'École normale supérieure, à Paris, viennent de montrer que ces matériaux topologiques seraient plus nombreux dans la nature qu'on ne le pensait.

La topologie est la partie des mathématiques qui s'intéresse aux propriétés globales d'un objet, celles qui ne varient pas quand on le déforme de façon

continue (en l'étirant, par exemple). Dans un matériau topologique, ce n'est pas la forme de l'objet qui compte, mais certains aspects de la description quantique et ondulatoire des électrons qu'il contient.

Du fait de l'agencement régulier des atomes dans la structure cristalline du matériau, les ondes associées aux électrons interfèrent. Les énergies que peuvent prendre ceux-ci sont alors restreintes à des intervalles continus, ou « bandes », séparées par des « gaps », des bandes interdites. Les électrons remplissent d'abord les bandes de plus basses énergies. La dernière bande complètement remplie est celle dite de valence. Si un électron passe dans la bande supérieure, la bande de conduction,

l'électron est libre de circuler dans le matériau. Si le gap qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est grand, l'électron ne peut jamais y parvenir : le matériau est alors isolant. Si le gap est petit, c'est un semi-conducteur : il faut fournir un peu d'énergie pour que des électrons puissent circuler. Si la bande de conduction est déjà partiellement remplie, ses électrons circulent facilement : on a un métal conducteur. La compréhension de ces propriétés a permis le développement de toute l'électronique moderne.

Dans les années 2000, le paysage des propriétés électroniques s'est enrichi. Les physiciens ont découvert des matériaux isolants en volume, mais conducteurs sur leur surface : les isolants topologiques. Ce caractère particulier est lié à des symétries dans la structure des bandes du matériau. De tels matériaux sont prometteurs en électronique car ils sont de très

Véhicules électriques : des batteries en Europe ?

En février dernier, la France a annoncé qu'elle apporterait 700 millions d'euros au cours des cinq prochaines années pour mettre en place une filière européenne de batteries pour voitures électriques, montant auquel s'ajouteront 1,12 milliard d'euros promis par l'Allemagne. Les commentaires de l'électrochimiste Jean-Marie Tarascon.



Propos recueillis par MAURICE MASHAAL

JEAN-MARIE TARASCON
professeur au Collège de France, chaire de chimie du solide et de l'énergie

Avez-vous des informations sur la façon dont cette filière européenne des batteries serait mise en place ?

Non. Il n'y a pas eu de concertation préalable à l'annonce du gouvernement avec les chercheurs qui travaillent sur les batteries en France, et nos homologues en Allemagne n'ont eux non plus pas été consultés. À ce jour, cette affaire n'a semble-t-il impliqué que les politiques et les industriels. Espérons en tout cas que ces fonds seront utilisés à bon escient. On ignore à quoi ils serviront, peut-être à la construction d'une grande usine de batteries au lithium-ion, à l'instar de la Gigafactory du constructeur américain Tesla, qui a coûté 2 milliards de dollars.

Est-ce cela la priorité selon vous ?

On peut comprendre que l'Europe cherche à acquérir une indépendance stratégique en matière de batteries pour voitures électriques, dont la production est actuellement concentrée en Asie. Mais développer une filière européenne qui puisse résister à la concurrence asiatique demandera du métier et des compétences. Surtout, cela nécessitera des engagements forts de la part des constructeurs automobiles européens, qui se fournissent aujourd'hui auprès des producteurs asiatiques. Même en mettant en place une usine géante, l'Europe ne pourra pas concurrencer l'Asie – la bataille des batteries à ions lithium (« lithium-ion ») est déjà perdue. Il faut à mon avis penser aussi à plus long terme, et en particulier investir dans des recherches sur des batteries « intelligentes ».

De quoi s'agit-il ?

Dans la société de demain, où les objets connectés seront omniprésents, les batteries occuperont une place cruciale. Or une voie prometteuse d'amélioration des batteries est non seulement

de maîtriser les interfaces électrode-électrolyte, mais d'introduire dans ces sources d'énergie des capteurs et des systèmes électroniques ou informatiques permettant de contrôler de façon optimale leur état de santé et leur fonctionnement. Cela permettrait par exemple d'allonger la durée de vie des batteries, de leur donner une seconde vie.

Les batteries au lithium-ion assurent une autonomie de l'ordre de 500 kilomètres avec des durées de recharge de plusieurs heures. Peut-on s'attendre à des améliorations notables ?

Il y aura des progrès, mais peu.

On sait aujourd'hui que la technologie lithium-ion est presque à son maximum, et il faudra trouver autre chose pour franchir de nouveaux paliers.

La technologie sodium-ion par exemple ?

Nous développons cette technologie, notamment avec la société Tiamat. Outre la disponibilité du sodium, l'atout est la puissance, mais le sodium-ion ne sera jamais compétitif en termes de densité d'énergie électrique. Le marché des batteries au sodium-ion ne concernera donc pas les voitures électriques, mais plutôt des applications exigeant une forte puissance et une charge rapide, par exemple des trottinettes électriques ou le stockage d'électricité issue de sources renouvelables et intermittentes.

Qu'est-ce qui pourrait alors remplacer les batteries au lithium-ion ?

Il existe aujourd'hui un engouement pour les batteries « tout solide », dont l'électrolyte est solide et non liquide. On pense que des batteries au lithium-métal (électrodes en lithium, électrolyte métallique) pourraient atteindre des performances supérieures de 30 % à celles des batteries au lithium-ion. Mais on ignore si elles verront le jour : on ne maîtrise pas encore assez les interfaces électrode-électrolyte, qui se dégradent en raison de contraintes mécaniques et de la croissance de cristaux dendritiques de lithium (un problème récurrent depuis trente ans, qui a suscité le développement du lithium-ion).

bons conducteurs. En effet, du fait de son origine topologique, la conduction a un caractère global: un défaut local n'altère pas la circulation du courant électrique.

Jusqu'à présent, on n'avait identifié qu'une centaine de matériaux topologiques. Les physiciens pensaient ainsi que les matériaux topologiques étaient plutôt rares, des sortes d'anomalies. En outre, calculer théoriquement les propriétés topologiques d'un matériau est très difficile, ce qui empêche de réaliser une recherche systématique parmi les 200 000 structures cristallines inorganiques connues. Or une telle exploration serait nécessaire pour trouver des matériaux faciles à fabriquer, non toxiques et intéressants pour des applications en électronique à température ambiante.

En 2017, Andrei Bernevig et ses collègues ont développé une nouvelle approche, la chimie quantique topologique. Dans ce cadre, les physiciens partent des symétries de la structure cristalline d'un matériau pour déterminer le comportement des électrons et mettre en évidence les éventuelles propriétés topologiques. Elle a rendu possible une recherche systématique, qui vient d'être réalisée par deux équipes. Celle d'Andrei Bernevig a analysé 27 000 matériaux dont la structure cristalline est très bien connue. Près de 27 % de ces matériaux seraient topologiques: ils ne seraient donc pas si rares !

Les deux équipes parviennent à des conclusions similaires quant à la profusion de matériaux topologiques. Cela reste cependant des prédictions et tous ces matériaux ne seront certainement pas intéressants pour des applications. Il faudra alors les tester expérimentalement. Pour faciliter la tâche des chercheurs, l'équipe d'Andrei Bernevig a créé un site internet qui les répertorie tous, avec leurs caractéristiques. Ce catalogue pourrait continuer à croître. Par exemple, la méthode utilisée ne permet pas, pour l'instant, d'analyser les matériaux magnétiques. « Pour établir l'existence de propriétés topologiques, il faut considérer 230 groupes de symétrie pour les matériaux non magnétiques », explique Nicolas Regnault; or ce nombre passe à 1651 pour les matériaux magnétiques. Il s'agit là de notre prochain défi scientifique à relever. ■

SEAN BAILLY

J. Zhang *et al.*, *Nature*, vol. 566, pp. 475-479, 2019 ;
M. G. Vergniory *et al.*, *ibid.*, pp. 480-485
Catalogue en ligne : <http://bit.ly/PL5498>. Topo

CLIMATOLOGIE

DES NUAGES EN VOIE D'EXTINCTION ?

Sous l'effet du réchauffement climatique, les nuages de type stratocumulus pourraient disparaître à partir d'une certaine concentration atmosphérique en CO₂.

Dans un contexte de réchauffement global de la planète, les modèles qui simulent l'évolution future du climat souffrent de deux principales sources d'incertitude: l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et les nuages.

70% du globe et réfléchissent une grande partie de la lumière du Soleil vers l'espace. Ils contribuent à refroidir la planète, mais qu'en sera-t-il demain? Y aura-t-il plus ou moins de nuages pour bloquer le rayonnement solaire? La réponse à cette question est complexe, notamment à cause de la diversité des nuages. Tapio Schneider, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont étudié un type particulier de nuages, les stratocumulus.

Depuis le début de l'ère industrielle, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre n'ont cessé d'augmenter: la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂) est passée de 280 ppm (parties par millions) avant 1850 à 410 ppm actuellement. Sur la même période, la température moyenne a augmenté de 1°C. Il est indiscutable que nous assistons à un réchauffement climatique, mais son ampleur future reste difficile à quantifier avec précision. Dans les scénarios les plus optimistes, les émissions anthropiques sont maîtrisées et réduites: l'élévation de température ne sera que de 2°C en moyenne d'ici à 2050. Mais selon certaines projections, avec l'hypothèse «business as usual» où les émissions continuent de croître au même rythme qu'aujourd'hui, la hausse atteindra 4 à 5°C.

Dans ce contexte, les nuages apportent aussi leur lot d'incertitudes. Les simulations numériques reposent sur un découpage de l'atmosphère en cellules d'environ 100 kilomètres de côté. Elles ne décrivent pas des phénomènes dont l'échelle caractéristique est de l'ordre du kilomètre, comme les nuages. Ceux-ci sont inclus sous la forme de paramétrisations, qui sont difficiles à définir car tous les types de nuages ne se comportent pas de la même façon.

Dans le cas des stratocumulus, des études précédentes avaient montré que, lors d'un réchauffement du climat, ces nuages s'aminçissent et laissent passer plus de lumière. Dès lors, la région en dessous chauffe davantage.



Il existe une grande diversité de nuages, comme ici des stratocumulus. Comment influent-ils sur le climat et, à l'inverse, comment le climat agit-il sur leur évolution? La réponse est encore incertaine.

12 °C

UNE ÉLEVATION DE TEMPÉRATURE QUE PROVOQUERAIT DANS LES TROPIQUES UNE CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE EN CO₂ DE 1 200 PPM, SOUS L'EFFET D'UNE PRÉSENCE IMPORTANTE DE VAPEUR D'EAU ET DE LA DISPARITION DES STRATOCUMULUS.

Tapio Schneider et ses collègues ont refait une simulation de stratocumulus qu'ils ont couplée à un modèle représentant une colonne de l'atmosphère tropicale. En faisant varier la concentration en dioxyde de carbone, les chercheurs ont observé qu'au-delà de 1200 ppm, trois fois la concentration actuelle (une concentration qui pourrait être atteinte dans cent ans dans le scénario «business as usual»), les nuages finissent par se morceler et disparaître.

«Le seul élément nouveau dans cette étude est ce point de basculement», note Sandrine Bony, du Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, «mais le modèle utilisé est extrêmement idéalisé. Il n'est pas du tout sûr que ce phénomène persisterait dans un modèle plus complet considérant la réponse des nuages couplée à celle de la circulation atmosphérique.»

La question de l'évolution des nuages bas ne sera résolue que grâce à une compréhension plus fine des processus mis en jeu et à des simulations intégrant les interactions des nuages et de la circulation atmosphérique. «Mieux comprendre et quantifier la réponse des nuages au réchauffement global et son impact sur la sensibilité climatique reste une priorité de la climatologie», conclut Sandrine Bony. ■

S.B.

Tapio Schneider et al., *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 163-167, 2019

DU PALUDISME IL Y A PLUS DE 20 000 ANS

Quand le paludisme est-il apparu en Afrique ? On pensait que cette maladie s'était diffusée avec l'arrivée de l'agriculture il y a 4 000 ou 5 000 ans. Mais une étude génétique d'une équipe de chercheurs de l'institut Pasteur et du CNRS vient de montrer que le paludisme africain remonte à 20 000 ans au moins. À cette fin, Guillaume Laval et ses collègues ont examiné l'acquisition par les populations d'une mutation particulière d'un gène liée à une maladie nommée drépanocytose, mutation qui protège contre le paludisme.

DES MOUCHES SANS SOMMEIL, NI SOULEVÉES

La privation de sommeil a toujours des effets délétères, estime l'Onu. Quentin Geissmann et deux collègues, à l'Imperial College de Londres, cherchent à nuancer cette idée. Ils ont réalisé une série d'expériences sur des drosophiles qui montrent deux choses. D'une part, certains individus ne dorment quasiment pas et ne portent pourtant bien. D'autre part, la privation de sommeil n'a pas d'effets négatifs, ou très peu, et en particulier ne réduit pas la longévité des mouches. Reste la question : à quoi bon le sommeil sert-il ?

UN NOUVEAU TRÉSOR À MAYA

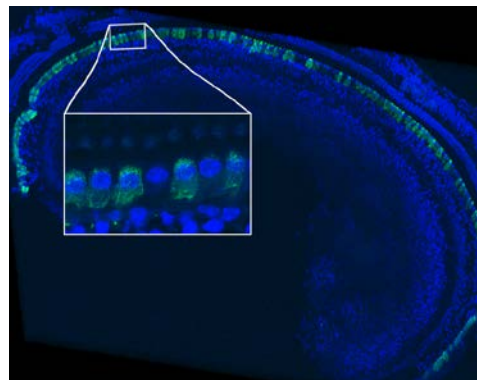
Sur la célèbre site de Chichén Itzá, au Mexique, une grotte publiée vient de livrer à l'archéologue Guillermo de Anda et son équipe plusieurs centaines d'objets en céramique datant probablement de l'époque postclassique entre les années 700 et 1000 de notre ère. Découverte il y a un demi-siècle par des habitants de la région, la grotte avait été obtenue sans être explorée. Son étude apportera peut-être les renseignements sur les Itzaes, le peuple maya qui vivait dans la région.

RÉTABLIR L'OUÏE CHEZ LA SOURIS

En France, près de 1 enfant sur 700 naît sourd et environ la moitié de ces cas sont d'origine génétique. À l'heure actuelle, le recours à des implants cochléaires permet de restaurer l'audition. Mais des chercheurs ont développé une nouvelle méthode fondée sur la thérapie génique.

Les chercheurs ont travaillé sur un modèle de souris mimant la surdité humaine de type DFNB9, qui est l'un des troubles auditifs congénitaux d'origine génétique les plus fréquents. Cette surdité est sévère, voire profonde avec une perte d'audition supérieure à 90 décibels. Elle est due à la mutation du gène codant une protéine, l'otoferline. Cette protéine permet normalement aux cellules sensorielles de l'oreille interne de libérer un neurotransmetteur qui stimule les neurones auditifs en réponse à un signal sonore.

Pour rétablir la production d'otoferline, les chercheurs ont utilisé la thérapie génique, qui consiste à introduire une version fonctionnelle du gène manquant ou altéré dans les cellules de la souris. Cette méthode repose sur des vecteurs, en général des virus à ADN non pathogènes, qui transportent et insèrent le gène d'intérêt dans les cellules cibles. Dans



Dans la cochlée de cette souris sourde traitée par thérapie génique, la production d'otoferline (en vert) est rétablie.

Cette étude, une fois l'ADN du gène de l'otoferline injecté, les cellules de la cochlée de la souris se sont mises à produire cette protéine, et la souris a ainsi acquis de façon durable des capacités auditives.

Ce résultat est aussi exceptionnel parce qu'il a été obtenu chez un rongeur dont la surdité était déjà installée à un stade mature. Or on pensait que pour être efficace, un tel traitement devait être appliqué au cours du développement embryonnaire. Ces travaux ouvrent aussi la voie à des études similaires, pour l'instant chez la souris, portant sur d'autres formes de surdité d'origine génétique. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

D. Akil et al., PNAS, en ligne le 19 février 2016

UN AÉROGEL ROBUSTE

Les aérogels sont des matériaux solides 1 000 à 10 000 fois moins denses que l'eau. En céramique, ils présentent aussi

des propriétés thermiques exceptionnelles. Hélas, soumis à des contraintes mécaniques importantes ou des chocs thermiques, ces matériaux se cassent. Xiang Xu, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont réussi à pallier ce défaut en utilisant du nitrure de bore graphitique. Comme les parois de leur aérogel sont creuses, le matériau se déforme sans s'abîmer.

De densité comprise entre 0,1 et 10 milligrammes par centimètre cube, cet aérogel résiste à de fortes variations de températures, entre -200 °C et 1400 °C. Il retrouve sa forme après une compression de 95% de son volume. Enfin, sa conductivité thermique est inférieure à celle



Cet aérogel céramique, posé sur les pistils de la fleur, est très peu dense et néanmoins très robuste.

de l'air : si l'on chauffe à 500 °C une face d'une épaisseur de 2 centimètres d'épaisseur, l'autre face atteint à peine 45 °C. Léger, excellent isolant thermique et robuste à toute épreuve, cet aérogel céramique est un candidat sérieux pour équiper, par exemple, des engins spatiaux. ■

MARTIN TIANO

X. Xu et al., Science, vol. 363, pp. 723-727, 2016

IL Y A 2,1 MILLIARDS D'ANNÉES, LA VIE BOUGEAIT DÉJÀ

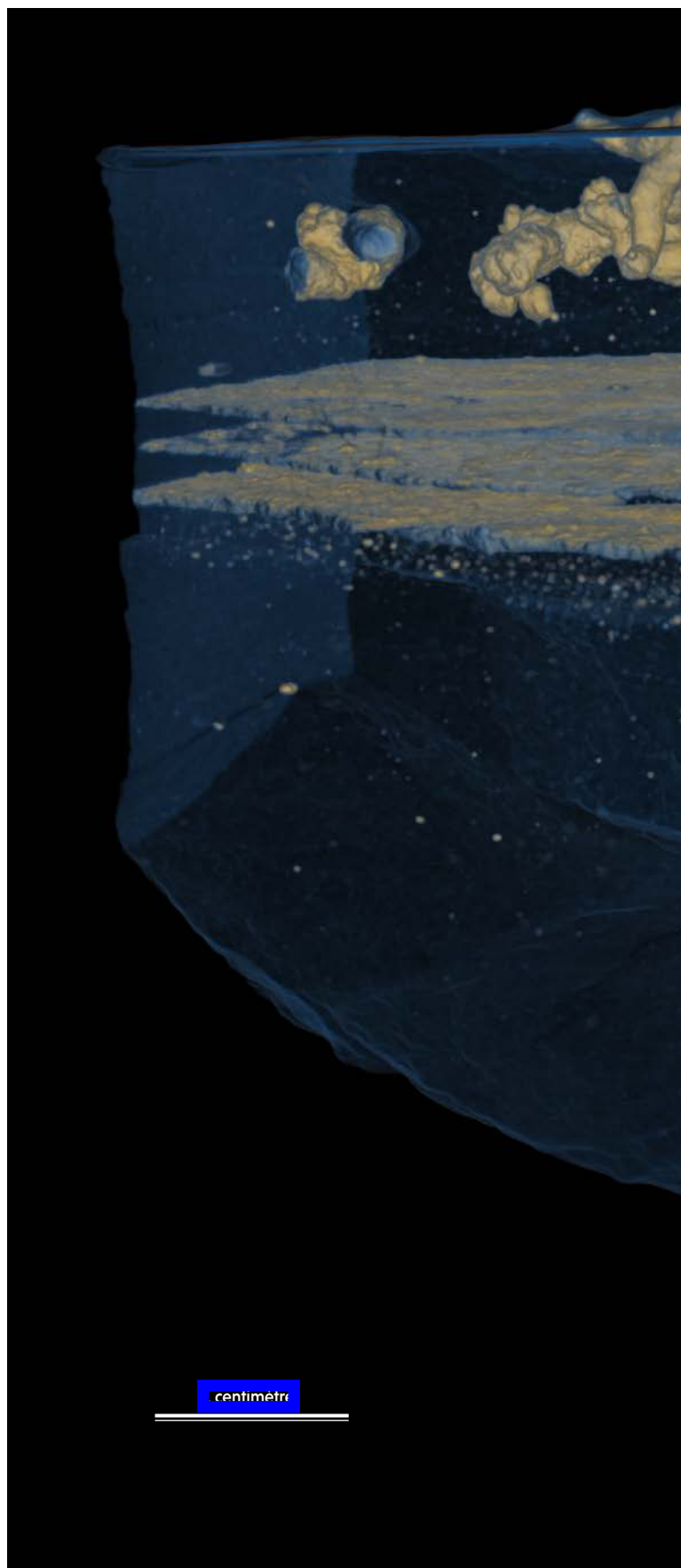
Au sein de roches vieilles de 2,1 milliards d'années du bassin sédimentaire de Franceville, au Gabon, l'équipe d'Abderrazzak El Albani, géologue à l'institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (CNRS-université de Poitiers), avait déjà identifié des fossiles d'organismes pluricellulaires. Dans les mêmes roches,

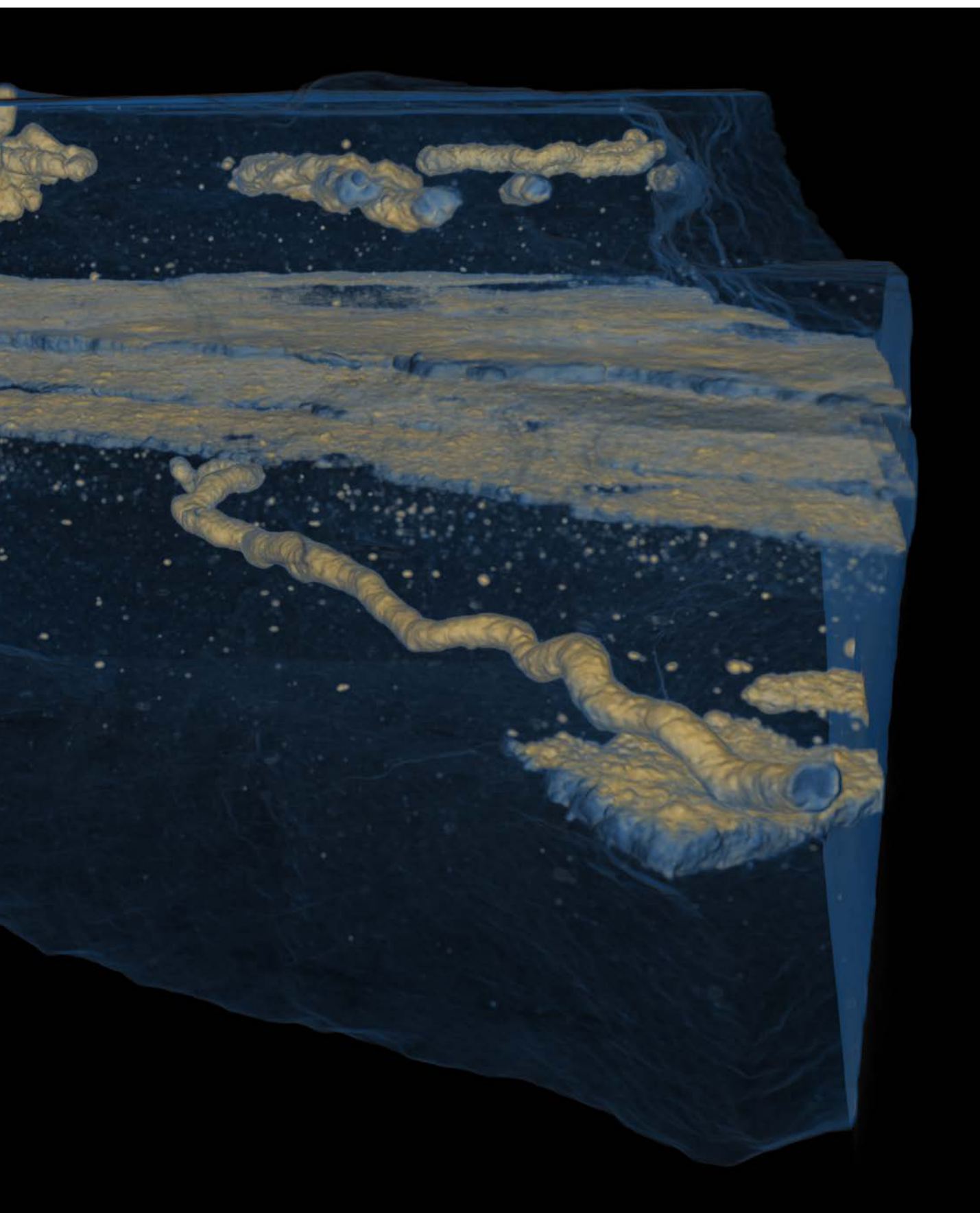
il a découvert le déplacement d'un tel organisme. Restituées numériquement en trois dimensions par microtomographie aux rayons X (voir ci-contre), ces traces plus ou moins sinueuses traversent les fines couches constituant le sédiment. Leur composition chimique prouve qu'elles sont contemporaines du dépôt sédimentaire et leur forme tubulaire, de quelques millimètres de diamètre, évoque un tube de ver dans la vase. Mesurant jusqu'à 17 centimètres de long, ces très anciens boyaux semblent donc le résultat de la progression, il y a 2,1 milliards d'années, d'un organisme dans la vase d'une mer peu profonde. Ils transpercent les biofilms fossilisés intercalés entre les couches sédimentaires (les couches horizontales en jaune, ci-contre), qui auraient constitué les « mines » de nutriments vers lesquelles ce terrien primitif était attiré.

A qui ressemblait-il ? Probablement à un être composé de cellules capables de se regrouper et de s'organiser pour migrer. L'amibe *Dictyostelium discoideum*, un organisme eucaryote (ses cellules ont des noyaux) qui, de collection d'amibes unicellulaires, passe à l'état de « limace » multicellulaire douée de mobilité, pourrait en constituer un analogue actuel. ■

FRANÇOIS SAVATIER

A. El Albani et al., PNAS, en ligne le 26 février 2019





GEOSCIENCES

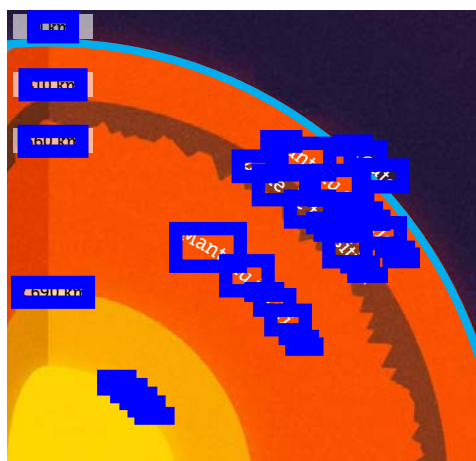
DES MONTAGNES SOUS NOS PIEDS

Le 9 juin 1994, un séisme de magnitude 8,2 a fait trembler la Bolivie. Les ondes sismiques produites se sont alors

propagées à travers le manteau terrestre. Grâce à de nouvelles méthodes d'analyse de ces ondes, Wenbo Wu, de l'Académie chinoise des sciences et de l'université Princeton, et ses collègues ont étudié la zone de transition entre le manteau supérieur et le manteau inférieur.

Lorsque les ondes sismiques rencontrent une discontinuité géologique, elles changent de vitesse de propagation, puisque la roche dans laquelle elles se propagent change de propriétés physiques. Par exemple, l'olivine, le principal composant du manteau, change de structure lorsque la pression et la température augmentent avec la profondeur. Vers 410 kilomètres de profondeur (à une température de 1 800 kelvins et une pression de 22 gigapascals), l'olivine se transforme en ringwoodite, plus dense. Cette zone de transition se termine vers 560 kilomètres de profondeur, où la ringwoodite devient de la bridgmanite. C'est cette transition à 660 kilomètres que l'on définit comme la frontière entre le manteau supérieur et le manteau inférieur.

Grâce à l'analyse des ondes sismiques, on savait déjà que cette frontière présentait des



MIEUX PURIFIER L'EAU

La photocatalyse est une technique utilisée pour purifier l'eau de toute contamination bactérienne. Néanmoins, elle

laisse des traces de métaux lourds. Il existe des photocatalyseurs moins toxiques, mais ils ont une efficacité réduite, car ils produisent moins d'ions oxygène, qui détruisent les pathogènes. Zhenyuan Teng, de l'université de Yangzhou, en Chine, et ses collègues ont développé un procédé qui utilise un matériau bidimensionnel, le nitrure de carbone graphitique, avec des groupes carboxyliques (COOH) fixés sur les bords. Exposé à la lumière, le matériau perd un grand nombre d'électrons, qui sont, ensuite, captés par l'oxygène pour former des ions bactéricides. Les chercheurs ont montré que ce système permet d'éliminer 99,999% de bactéries, par exemple *Escherichia coli*, dans l'eau, en 30 minutes. ■

S.B.

Z. Teng et al., *Chem*, en ligne le 7 février 2019

NÉANDERTAL CANNIBALE

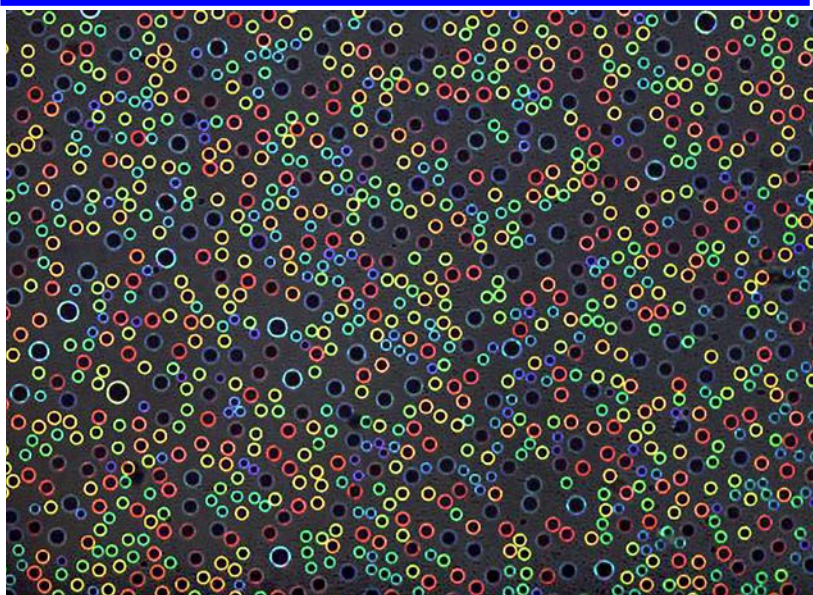
La couche XV de la grotte de la Vache-Moula-Guercy, située à Soyons, au sud de Valence, contient les restes d'un repas

quelque 120 000 ans. Alban Defleur, de l'École normale supérieure de Lyon, et Emmanuel Desclaux, du laboratoire du Lazaret, à Nice, ont démontré à partir des restes de faune découverts qu'un climat méditerranéen plus chaud que celui d'aujourd'hui régnait alors autour de cette grotte dominant le Rhône. Sa survie en très peu de générations a confronté les chasseurs adaptés aux steppes froides à la nécessité de débiter désormais des proies de taille moyenne dans la dense forêt méditerranéenne. Leur installation près du Rhône suggère que la pêche a constitué l'une de leurs réponses à ce défi d'adaptation. Le bref épisode de cannibalisme alimentaire documenté par la couche XV en aura constitué une autre, un jour où le clan devait traverser une mauvaise passe, suggèrent les chercheurs. ■

S.B.

A. R. Defleur et E. Desclaux, *Journal of Archaeological Science*, en ligne le 19 février 2019

DE LA COULEUR AVEC DES GOUTTES DE JANUS



Dans cet ensemble de gouttes biphasées micrométriques, celles de taille identique émettent la même

A lors qu'ils étudiaient l'indice de réfraction de gouttes biphasées, Lauren Zarzar, de l'université d'Etat de Pennsylvanie et ses collègues ont découvert une façon originale de produire d'intenses couleurs. Ces gouttes biphasées, dites de Janus d'après le dieu romain aux deux visages, sont composées de deux parties, chacune contenant une solution différente. En l'occurrence, les chercheurs étudiaient des gouttes d'heptane et de perfluoro

perfluorohexane, et les deux huiles forment une interface concave. En produisant dans une émulsion un grand nombre de gouttes de même taille et, *a priori*, incolores, les chercheurs ont remarqué que celles-ci émettent une couleur intense lorsqu'elles sont éclairées par en haut avec une lumière blanche. Et cette couleur change selon l'angle sous lequel on les regarde.

Les chercheurs ont déterminé l'origine de cette couleur. Dans chaque goutte de Janus, les rayons de lumière arrivant par en haut subissent des réflexions totales sur l'interface concave entre l'heptane et le perfluorohexane. Comme tous les rayons ne suivent pas le même chemin, ils interfèrent lorsqu'ils ressortent de la goutte, ce qui produit une couleur particulière. Ce phénomène d'interférence dépend beaucoup de la géométrie de l'interface (la taille de la goutte, sa composition) en plus de l'angle de vue de l'observateur. La lumière s'échappe de la goutte principalement dans la zone où l'heptane, le perfluorohexane et l'eau sont en contact. Ainsi, chaque goutte semble cerclée par un anneau de couleur.

Comme la sensibilité à la géométrie de l'interface concave est importante, Lauren Lazar et ses collègues pensent que ce phénomène serait exploitable pour des applications dans le domaine des capteurs et de l'affichage. ■

S.B.

L. E. Goodling et al., *Nature*, vol. 566, pp. 523-527, 2019

MEDECINE

REPROGRAMMER DES CELLULES POUR COMBATTRE LE DIABÈTE

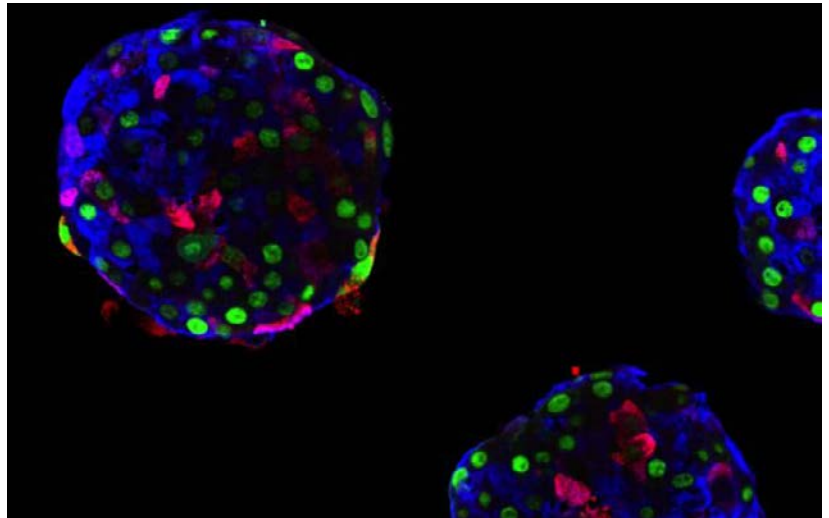
On peut reprogrammer certaines cellules du pancréas pour qu'elles produisent de l'insuline et pallient l'absence de leurs consœurs habituellement responsables de cette fonction.

En 2014, dans le monde, 422 millions de personnes étaient atteintes de diabète. Près de 10 % de ces cas sont des diabètes de type 1, une maladie qui apparaît chez les enfants et les jeunes adultes lorsque leur pancréas ne produit plus

l'insuline, hormone responsable de l'assimilation du glucose par l'organisme est sécrétée par les cellules β situées dans les îlots de Langerhans, des structures du pancréas. Mais les personnes atteintes du diabète de type 1 développent une réaction auto-immune qui détruit ces cellules. Actuellement, le principal traitement consiste en des injections régulières d'insuline. Toutefois, une nouvelle étude dirigée par Pedro Herrera et Kenichiro Furuyama, de l'université de Genève, montre que certaines cellules pancréatiques humaines disposent de la plasticité nécessaire pour changer de fonction et produire l'insuline manquante.

Des études précédentes avaient déjà démontré cette plasticité cellulaire chez la souris. Pour vérifier qu'elle existe également chez l'humain, Pedro Herrera et ses collègues ont travaillé sur des îlots de Langerhans issus de donneurs diabétiques et sains. En particulier, ils se sont intéressés à d'autres cellules de ces îlots, très similaires aux cellules β : les cellules α , qui sécrètent une hormone hyperglycémisante, le glucagon, et les cellules γ , qui produisent l'hormone polypeptide pancréatique. Dans ces cellules, les chercheurs ont déclenché l'expression de deux gènes (*PDX1* et *MAFA*), qui sont nécessaires au développement, à la maturation et à l'activité de synthèse d'insuline des cellules β , et qui sont normalement silencieux dans les cellules α et γ .

Les chercheurs ont alors reconstitué des pseudo-îlots composés uniquement de cellules α ou de cellules γ . Une semaine plus tard, plus d'un tiers des cellules α produisaient de l'insuline et la sécrétaient en réponse à la présence de glucose, et les cellules γ en faisaient tout autant, voire plus efficacement. L'équipe genevoise a ainsi montré qu'il était possible de reprogrammer ces cellules pour qu'elles combaient l'absence de leurs « consœurs ».



Dans ces pseudo-îlots de cellules α humaines, les cellules produisent du glucagon (en bleu) mais aussi de l'insuline (en rouge). Des traceurs (en vert) ont permis de vérifier l'origine de ces cellules.

Afin de vérifier la durabilité de ces modifications, les auteurs de l'étude ont transplanté ces pseudo-îlots reconstitués chez des souris diabétiques. Résultat : leur glycémie s'est stabilisée, même plus de six mois après la transplantation. Lorsque les pseudo-îlots ont été retirés, la glycémie s'est de nouveau déséquilibrée.

Dans ces expériences, les cellules α ont conservé leur identité cellulaire originale. Mais du fait de leur nouvelle capacité de production d'insuline, risquaient-elles d'être victimes d'une réaction auto-immune similaire à celle qui détruit les cellules β chez les personnes atteintes de diabète de type 1 ? L'équipe de Genève a alors cultivé ces cellules conjointement avec des cellules immunitaires de personnes diabétiques et n'a observé aucune réaction de toxicité limitée.

Face à l'inefficacité et à la lourdeur sur le long terme de traitements tels que l'injection quotidienne d'insuline, la greffe d'îlots ou de pancréas, ces travaux offrent une piste thérapeutique prometteuse. Cependant, les chercheurs doivent d'abord trouver un moyen de stimuler ces adaptations cellulaires directement dans le pancréas des patients, sans causer d'effets secondaires sur d'autres cellules. ■

W.R.P.

K. Furuyama et al., *Nature*, en ligne le 13 février 2019.

UNE CHAUVE-SOURIS HYPOCRISSE DE PLUS

Europe compte une cinquantaine d'espèces de chauves-souris (parmi un millier dans le monde). Quatre chercheurs de la station biologique de Doñana, en Espagne, du Muséum de Genève et de l'université de Montpellier viennent de rajouter une espèce à ce tableau. Javier Buste et ses collègues l'ont nommée *Myotis crypticus*, ou « murin cryptique ». Cette chauve-souris était auparavant confondue avec *Myotis nattereri*, morphologiquement très proche, mais dont l'ADN montre qu'il s'agit d'espèces différentes.

RETRAITE MERITEE POUR OPPORTUNITÉ

Le 13 janvier 2019, la mission sur Mars rover Opportunity de la Nasa a pris fin. Conçu initialement pour fonctionner 90 jours et parcourir environ 1 000 mètres, le module a poursuivi sa mission pendant 15 ans et aura roulé sur 45 kilomètres. Il a pris pas moins de 217 000 photographies et analysé de nombreuses roches. Il a notamment confirmé la présence de l'hématite, une espèce minérale qui ne se forme qu'en présence d'eau liquide.

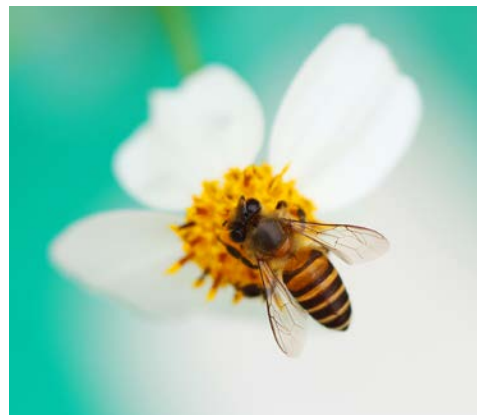
REGENERATION ET FORÊTS TROPICALES

Plus de la moitié des forêts tropicales ne sont pas des forêts anciennes, mais en cours de régénération naturelle. Elles repoussent après un épisode de déforestation souvent lié à l'agriculture ou l'élevage de bétail. Danaë Rozendaal, de l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, et une équipe internationale ont étudié la biodiversité de ces forêts. Résultat : en moins de cinquante ans, ces espaces présentent une diversité d'espèces équivalente à celle des forêts anciennes, grâce en partie aux espèces pionnières. Mais il faut plusieurs siècles pour retrouver une même composition.

LES ABEILLES, FORTES EN MATHS

L'abeille a la réputation d'être un insecte aux riches capacités cognitives. Aurore Avarguès-Weber, de l'université de Melbourne, en Australie, sous la direction d'Adrian Dyer, se sont intéressés à ses capacités en mathématiques. Ils viennent de montrer que l'abeille est capable d'additionner et de soustraire.

Dans les expériences, les insectes étaient confrontés à un labyrinthe en Y avec une entrée puis deux couloirs les obligeant à choisir : un « bon » couloir menant à une récompense, une solution sucrée, et un « mauvais » couloir, avec une solution amère de quinine. À l'entrée du labyrinthe, un panneau affichait de 1 à 5 éléments, tous bleus ou tous jaunes. La couleur bleue codait pour l'addition d'un élément, le jaune pour la soustraction d'un élément. Dans le labyrinthe, un des deux embranchements présentait le bon nombre d'éléments, l'autre non. Au début, les abeilles choisissaient de façon aléatoire le couloir emprunté, puis, lors d'une phase d'apprentissage, elles ont intégré les règles, le rôle de la couleur et son influence sur la bonne décision dans le labyrinthe. À chaque essai, les panneaux étaient disposés de façon aléatoire, le bon couloir n'étant pas toujours le même, les deux panneaux variaient, etc.



Les abeilles ont suffisamment de capacités cognitives pour additionner et soustraire.

Après une centaine d'essais pour chaque abeille (soit 4 à 7 heures), la probabilité de réussite atteignait environ 80%, soit bien plus qu'un choix fait au hasard.

Cette capacité à additionner et soustraire est complexe, car il faut maîtriser la notion de nombres ainsi que faire appel à la mémoire à long terme et celle de travail pour résoudre le problème. La taille du cerveau de l'abeille, bien que modeste, ne semble pas être un obstacle ou un facteur limitant. Les concepteurs d'intelligences artificielles s'en inspireront-ils pour inventer des systèmes performants? ■

S. B.

A. R. Howard et al., *Science Advances*, vol. 5, article eaav0961, 2019

MÉGALITHES MARITIMES

L'origine du mégalithisme était l'objet de deux hypothèses. On considérait traditionnellement que l'habitude de

dresser des blocs de pierres s'est diffusée depuis le Proche-Orient le long des côtes méditerranéennes, puis atlantiques. Après des datations effectuées dans les années 1970, l'hypothèse de plusieurs développements indépendants en Europe est apparue, puis s'est imposée. Récemment, Bettina Schulz Paulsson, de l'université de Göteborg, en Suède, a exploité 2410 datations issues de sites mégalithiques, prémégalithiques ou contemporains afin de construire un modèle probabiliste de l'émergence des mégalithes en Europe.

Il ressort finalement que le mégalithisme est l'abord apparu dans le nord-ouest de la France

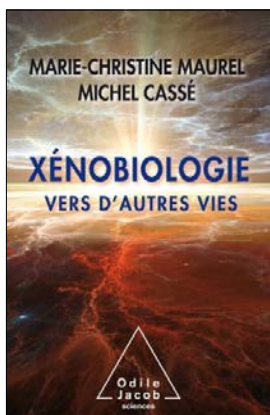
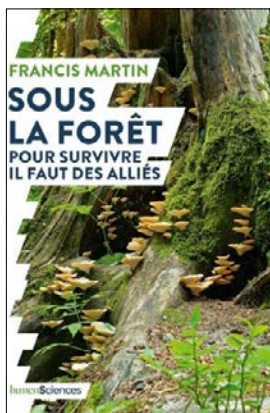


Le dolmen de Crucuno, à Plouharnel, dans le Morbihan, est ce qui reste d'une allée couverte de 27 mètres de long.

pendant la seconde moitié du V^e millénaire, puis s'est répandu en trois vagues successives sur la côte atlantique espagnole puis dans l'espace méditerranéen. L'hypothèse d'un développement initial du mégalithisme dans l'ouest français, puis d'une diffusion maritime, semble donc s'imposer, ce qui implique qu'au Néolithique, il y avait déjà un grand savoir-faire marin. ■

S. B.

B. Schulz Paulsson, *PNAS*, en ligne le 11 février 2019



BOTANIQUE

SOUS LA FORÊT

Francis Martin

HumenSciences, 2019

140 pages, 19,90 euros

Il est une génération de biologistes qui, après avoir reçu une culture

classique, dans les années 1980, se sont approprié aussi les outils de la biologie moléculaire pour les mettre au service d'une compréhension de la nature. Ce parcours est celui de l'auteur, qui a passé sa vie avec les champignons... à l'Inra. Dès lors, les méthodes qui ont révolutionné notre vision du monde des champignons apparaissent tout au long de chapitres courts et incisifs, dans la description des organismes que l'auteur nomme « les bons, les brutes et les triands ».

Les triands sont les parasites, notamment des plantes; les brutes, ce sont les décomposeurs de matière morte, qui recyclent la biomasse en molécules utilisables par les plantes; les bons sont ceux qu'il affectionne le plus et dont il est un spécialiste: les champignons qui vivent en symbiose avec les racines et y obtiennent des nutriments en échange de sels minéraux.

L'auteur peint les champignons dans une perspective évolutive et dans le contexte forestier, parce que c'est surtout là qu'il a travaillé. Certains chapitres sont d'ailleurs centrés sur une espèce d'arbre particulière, telle le pin ou le peuplier. Le livre nous emmène aux quatre coins du monde pour des travaux de terrain ou des collaborations de l'auteur, mais aussi par les voyages des champignons après les glaciations ou dans la globalisation actuelle. Intimité des lichens, fonctionnement des sols, dialogues souterrains avec les racines des arbres, champignons alliés des insectes... Ces vies secrètes de champignons sont à la fois poétiques et autobiographiques, mais surtout jamais ennuyeuses.

MARC-ANDRÉ SELOSSE
MNHN, PARIS

PALEONTOLOGIE

LE MYSTÈRE DES GÉANTS

Emmanuelle Grundmann

avec Pierre-Olivier Antoine

La Martinière, 2018

102 pages, 29,90 euros

Parmi les animaux disparus, ce n'est pas seulement chez les

dinosaures qu'il faut chercher des formes gigantesques aux formes étranges. Comme nous le rappelle ce livre, après la disparition des colosses du Mésozoïque à la fin du Crétacé, d'autres animaux, appartenant à des groupes variés (des requins aux mammifères, en passant par les serpents, les crocodiles et les oiseaux), ont évolué vers des formes de très grande taille. C'est ce monde des géants du Cénozoïque que nous fait découvrir cet ouvrage, qui accompagne un long-métrage et une série documentaire – ce qui se reflète dans sa construction: une série de courts chapitres, entrecoupés de « portraits » d'animaux disparus et d'entretiens avec les chercheurs, le tout copieusement illustré, notamment par des images de synthèse.

De *Titanoboa*, serpent vieux de 60 millions d'années, long de 12 mètres et pesant plus de 1 tonne, à *Gigantopithecus*, sorte d'orang-outan gigantesque disparu il y a quelque 20 000 ans, haut de plus de 2 mètres et pesant 300 kilogrammes, en passant par des rhinocéros bien plus grands que nos éléphants actuels et des paresseux terrestres de 4 à 5 tonnes, le catalogue est impressionnant.

Il ne s'agit d'ailleurs pas seulement d'une énumération de records: les causes et les conséquences de ce gigantisme sont discutées, ce qui permet d'aborder des sujets aussi variés que l'évolution insulaire, les changements climatiques, les rapports prédateurs-proies... et bien sûr les phénomènes d'extinction, car le la « mégafaune » qui habitait encore de nombreuses régions du monde il y a quelques dizaines de milliers d'années, il ne reste plus que quelques témoins menacés de disparition, sur le sort desquels le livre nous interpelle. Pour ceux qui en douteraient encore, il nous rappelle aussi que, fort heureusement, la paléontologie ne se limite pas aux dinosaures!

ERIC BUFFETAUT
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE, ENS, PARIS

BIOLOGIE

XÉNOBIOLOGIE

Marie-Christine Maurel
et Michel Cassé

Odile Jacob, 2018

264 pages, 26,50 euros

Une biochimiste spécialiste
de l'origine de la vie et un

physicien convergent vers une
synthèse multidisciplinaire exemplaire
de ce que pourrait être la biologie
d'êtres étrangers à la Terre.

Trois chavittres s'articulant
harmonieusement nous livrent des
données factuelles qui sont autant de
clés de lecture pour mener la réflexion.
Le premier, intitulé « Prolégomènes
biologiques », retrace l'avancée de
nos connaissances sur l'origine
(les origines?) de la vie telle que nous
la concevions hier et telle que nous
la concevons aujourd'hui. Le deuxième
chapitre, « Cosmobiologie – une vision
cosmique de l'avant-vie », nous explique
l'origine stellaire de certains atomes
constituant le vivant et nous plonge
au cœur même des nuages de gaz
interstellaires ou des comètes
renfermant des acides aminés.
Enfin, le troisième et dernier chapitre,
« Xénobiologie, prolégomènes à une
biologie future » ouvre le débat, sans
pour autant prendre parti, sur la
biologie de synthèse, ses objectifs,
ses applications et ses dérives possibles.
Le ton est scientifique, donc neutre,
et les notions techniques bien
explicitées sous forme de notes de bas
de page et de figures, nombreuses.
En fin d'ouvrage, des photos de
l'herbier du Muséum national d'histoire
naturelle, où travaille la biochimiste,
illustrent de façon poétique les formes
variées que peuvent prendre certaines
molécules organiques.

Les auteurs relèvent donc le défi
de réunir d'une manière logique et
en un seul ouvrage les données récentes
en matière d'astrophysique,
de cosmochimie, d'exobiologie
et de biologie de synthèse. Ils tissent
en outre d'habiles ponts entre recherche
fondamentale, appliquée, histoire
des sciences et littérature, car chaque
donnée correspond à une découverte
bien replacée dans son contexte
historique: un ouvrage à ne pas manquer.

JEAN-SÉBASTIEN STEYER
CNRS ET MNHN, PARIS

HISTOIRE DES SCIENCES

COMMENT PENSE UN SAVANT ?

Jean-François Bert

Anamosa, 2018

124 pages, 20 euros

Dans ce joli petit livre, l'auteur
consulte Georges-Louis Le Sage

sur un genre rare des *Samizdat*,
en explorant son abondante
collection de 35 000 cartes à jouer,
exceptionnellement conservée dans
des sachets étiquetés. Le Sage y notait
jour après jour au dos de ces cartes
(probablement de rebut, et achetées
en gros) des observations, des idées
diverses, des critiques d'ouvrages,
les notes et des références.

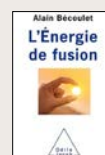
Excellent observateur, formulant
constamment de nouvelles idées,
le physicien pose les bonnes questions
et rêve d'écrire des ouvrages
« fondamentaux » qu'il n'aura pas la
possibilité de réaliser. Lui-même est
parfaitement conscient – et il s'analyse
dans une série de cartes dédiées –
de son blocage, du temps qu'il passe
chaque jour à compléter, classer,
réordonner ses cartes, ce qui lui ôte
la tranquillité d'esprit permettant une
attitude distanciée favorable à l'écriture,
notamment sur sa théorie de la
gravitation due selon lui à l'impulsion
de « corpuscules ultramondains ».
Quelques mémoires seront cependant
couronnés de prix, quoique souvent
critiqués.

En fait, ce que réussit le mieux
ce savant, c'est l'élaboration d'une
méthode de classement, qu'il suit
rigoureusement, notant même ses
réflexions sur ce concept, mais aussi
son arbitraire. Plus que le contenu
des cartes, c'est leur ordonnancement
en un système souple et dynamique,
constamment ouvert qui est
remarquable.

En exploitant ces notes, l'auteur
nous montre le savant désirant rénover
les sciences, ou dénonçant le plagiat,
mais aussi amer de ne pas être reconnu
à sa juste valeur, et désolé de son
incapacité à réaliser une œuvre parfaite.
Tout l'art de Jean-François Bert est
de réussir à nous le faire estimer.

DANIELLE FAUQUEL
HDSO, UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ET AUSSI



FRÈRE DES ORQUES

Pierre Robert de Latou

Plénat, 2019

156 pages, 10,95 euros

Etant donné son grand talent
d'anneiste, l'auteur s'est fait
introduire par les organisateurs
des rencontres avec les orques
norvégiennes. Il raconte les
observations faites au fil de ses
séjours, les interactions avec des
familles d'orques qui finissent par le
reconnaître, le sauvetage d'un puissant
mâle empêtré dans la bouée d'un filet,
etc. À force de fréquenter ces animaux,
il a aussi mis au point une méthode
de plongée en apnée facilitant des
rencontres à grande proximité et
sûre. Un livre qui regorge
d'observations passionnantes sur
le comportement de ces magnifiques
cétacés sociaux et curieux.

L'ÉNERGIE DE FUSION

Alain Béroulet

Odile Jacob, 2019

104 pages, 25 euros

Le directeur de l'Institut de
recherche sur la fusion magnétique
du CEA survole les soixante ans de
recherche qui viennent de s'écouler,
puis le principe du tokamak afin de
nous faire comprendre où le projet
phare *Iter* en est. On mesure ainsi
les efforts de la « communauté de la
fusion » thermonucléaire pour pallier
aux disruptions du plasma, à la
destruction des parois par les
radiations, etc. On apprend à la fin du
livre que les recherches en fusion par
confinement magnétique entrent
« dans l'ère de la faisabilité à
échelle 1 ». Bref, dans celle d'*Iter*
– mais cela, on nous l'avait déjà
annoncé il y a longtemps.

MÉDECINS ET PHILOSOPHES

Claire Crignon et David Lefebvre (dir.)

CNRS Éditions, 2019

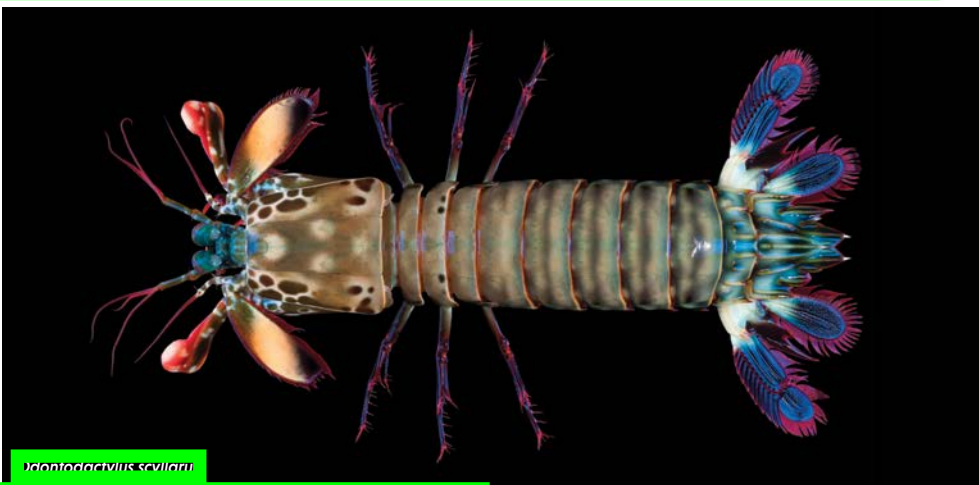
112 pages, 26 euros

La médecine et la philosophie
se sont séparées dans l'Antiquité.
Le dialogue qu'elles ont toujours
entretenu ensuite, notamment quant
au statut épistémologique de la
médecine, est retracé ici à travers les
siècles à la faveur de quinze
contributions universitaires. On
apprend ainsi que pour Galien de
Pergame, l'excellent médecin et
philosophe, ou que pour Georges
Canguilhem, médecine et philosophie
ne sont... que des techniques. De quoi
découvrir les liens qui ont longtemps
lié la « médecine de l'âme »
et la « médecine du corps ».

PARIS

DU 3 AVRIL AU 5 JANVIER 2020
Muséum national d'histoire naturelle
www.mnhn.fr

Océan, une plongée insolite



Idontodactylus seiviani

Couvrant 71% de la surface du globe, les océans constituent une immensité encore assez mal connue. Notamment 95% de la masse est formée d'organismes microscopiques, du plancton pour la plupart. La grande exposition de cette année au Muséum propose à ses visiteurs de plonger dans l'univers océanique loin du littoral et des aspects familiers. L'exploration des mers et de leur biodiversité, avec ses difficultés, en constitue le

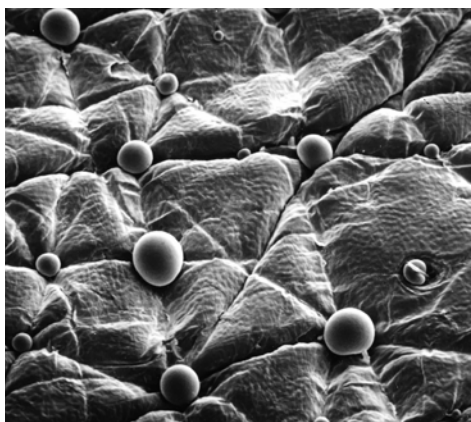
premier volet. Suit un espace consacré aux organismes transportés au gré des courants, c'est-à-dire le plancton, puis on découvre les milieux extrêmes – les grandes profondeurs, les mers glacées et leurs habitants si particuliers. On poursuit avec les innovations médicales ou technologiques apportées par le monde marin, pour finir avec des êtres mythiques tels que le calmar géant ou le régaléc. Le tout sans oublier les menaces comme l'acidification et la pollution par les plastiques. ■

PARIS

JUSQU'AU 3 JUIN 2019
Musée de l'Homme
www.museedelhomme.fr

Dans ma peau

Quel organe humain a une surface de près de 2 mètres carrés et pèse 3 à 5 kilogrammes chez un adulte? La peau. Ce tissu complexe, étonnant, étonnant, élément qui conditionne notre apparence et nos relations aux autres, la peau fascine depuis longtemps les biologistes. Aujourd'hui, on connaît suffisamment son fonctionnement pour savoir reconstruire une peau pigmentée avec son derme, la couche sur laquelle repose l'épiderme. Ce qui permet en retour de mieux comprendre son vieillissement ou certaines maladies cutanées. L'Oréal, en partenariat avec le Muséum national d'histoire naturelle et le Musée de l'homme, revient sur ces quarante années de recherche



dans une exposition immersive et interactive où, tour à tour lilliputien explorant la peau, puis chercheur ayant pour mission de sauver un grand brûlé, l'on découvre toutes les facettes de cet organe fascinant. À l'étage, une exposition sur le rôle sociétal du piercing depuis 45000 ans complète le voyage de façon originale. ■

ET AUSSÉ

Mardi 2 avril, 20 h 30
Les Champs Libres, Rennes
www.espace-sciences.org
LA PLUS BELLE DES INVENTIONS QUANTIQUES
Julien Bobroff, physicien à l'université Paris-Sud, raconte la physique quantique du magnétisme, phénomène aux nombreuses applications, notamment médicales.

Vendredi 4 avril, 18 h
Campus Joseph Aiguier, Marseille
provence-corse.cnrs.fr
LUCY ET LES ORIGINES DE L'HOMME
Maurice Taieb, codécouvreur de Lucy, vient raconter la découverte de ce fossile sur le site de Hadar, ainsi que les trouvailles ultérieures en relation avec l'émergence du genre humain.

Vendredi 4 avril, 12 h 30
Université Paul-Sabatier, Toulouse
www.univ-tlse3.fr
GRAISSES ET SUCRES, VRAIS OU FAUX ENNEMIS ?
Une conférence de Virginie Bourlier, chercheuse à l'Institut des maladies métaboliques et cardiovasculaires, pour expliquer l'impact sur la santé des divers sucres et graisses de notre alimentation.

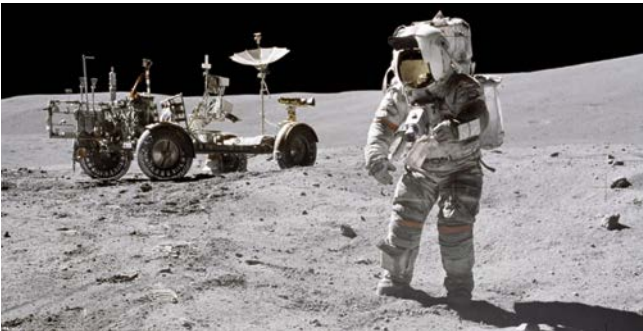
Les 12, 13 et 14 avril
Parc zoologique de Paris
parczoo.paris.fr
WEEK-END FESTIF AU ZOO
Le Parc zoologique de Paris fête ses cinq ans d'existence. À cette occasion, il accorde la gratuité aux enfants de moins de 13 ans, présente des animations, met en avant les nouveautés...

Mardi 16 avril, 20 h 30
Muséum de Nantes
nantesmetropole.fr
LA PHARMACOPÉE DES GRANDS SINGES
Sabrina Krief, spécialiste des primates au Muséum national d'histoire naturelle, raconte comment se soignent les chimpanzés et autres grands singes.

VILLENEUVE D'ASCQ

JUSQU'EN DECEMBRE 2019
Forum départemental des sciences
www.forumdepartementaldessciences.fr

Apollo 1961-1972



Le 21 juillet 1969, Neil Armstrong et Buzz Aldrin foulèrent pour la première fois le sol de notre satellite naturel, la Lune. Le cinquantenaire de cet événement sensationnel est célébré par une série d'expositions... dont celle-ci, qui présente en images, documents d'archives et maquettes le programme spatial américain Apollo. Le public pourra ainsi revivre l'extraordinaire épopée qui s'est étalée sur plus d'une dizaine d'années, comprendre sa complexité et les difficultés qu'a dû surmonter la Nasa pour remporter, face aux Soviétiques, la course à la Lune.

VALLON PONT D'ARC (07)

DU 6 AVRIL AU 22 SEPTEMBRE
La caverne du Pont-d'Arc
mrottechauvet2ardeche.com



Des lions et des hommes

La caverne du Pont-d'Arc, réplique de la grotte Chauvet, présente une exposition qui explore les relations qu'ont entretenues les humains avec les félins, de la préhistoire jusqu'à l'époque prémoderne. Elle présente 180 œuvres (objets sculptés ou gravés, amulettes, masques...), dont un lionceau des cavernes momifié et congelé venant de Sibérie et datant de 46 000 ans.

SORTIES DE TERRAIN

samedi 13 avril, 9 h 45
Écrille (Jura)
Tél. 06 03 05 03 18
<https://cbnfc-ori.org/>
MOUSSES DES MONTEILLIERS
Une sortie de niveau débutant ou confirmé à la rencontre des bryophytes des marais tuffeux des Montelliers.

samedi 13 avril, 9 h
Mazaugues (Var)
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org
BAUXITE À MAZAUGUES
Un parcours de 5 heures sur 14 kilomètres pour explorer le bassin crétacé de Mazaugues, les gorges du Caramon.

Dimanche 21 avril, 9 h 30
Mennecy (Essonne)
Tél. 01 64 22 61 17
www.anvl.fr
ZOOLOGIE AQUATIQUE
Une journée d'excursion pour découvrir les milieux aquatiques des environs et la faune qu'ils abritent.

Direction des relations avec les entreprises

cnrs

formation entreprises

Organisme de formation continue

→ 250 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens

→ Domaines de formation
Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, urbanisme, enjeux sociétaux... et plus encore

de 1600 stagiaires en 2018



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

@CNRS_CFI



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

PLUS DE TECHNIQUE, MOINS D'ACCIDENTS?

Les lois et les impôts ne sont pas les seuls outils
pour gouverner. La technique en est aussi un.

Illustration avec la conduite automobile



Certains
techniques
modernes
ident
le conducteur
à réduire
le risque
d'accident.
Généraliser
ces solutions
pourrait être
plus efficace
que des lois
et des
amendes.

En vigueur depuis le 1^{er} juillet 2018, la limitation de la vitesse sur les routes à 80 kilomètres par heure est loin d'avoir fait l'unanimité, alors qu'elle a permis d'éviter plusieurs dizaines d'accidents mortels en France.

Ces mesures sont parfois contestées, et que son coût est minime: sur un trajet de 40 kilomètres, par exemple, rouler à 80 kilomètres par heure au lieu de 90 ne fait perdre que 2 minutes et 20 secondes.

Pour comprendre ce paradoxe, il est utile d'examiner les arguments des pour- et des contre-tenants de cette baisse de la vitesse autorisée. Un premier argument est que nous vivons dans une société dans laquelle il y a trop de lois et trop de règlements. Cet argument est parfois exprimé comme une revendication de la liberté de conduire à la vitesse que l'on souhaite – comme c'est le cas sur les autoroutes en Allemagne. Il est aussi parfois exprimé comme le fait que cette limitation a été décidée «à Paris» par des gens qui ignoreraient tout de la vie de

ceux qui sont obligés de prendre leur voiture pour se déplacer ou comme une certaine exaspération face au principe de précaution, qui nous inciterait à limiter la vitesse à zéro pour éviter tout risque d'accident. Par ailleurs, un second argument voit en cette limitation un simple prétexte pour augmenter le nombre d'amendes, et donc les impôts.

Une machine ne se fatigue
jamais de vérifier
la distance avec le véhicule
qui la précède

Il est vrai que, pour résoudre des problèmes très divers, les gouvernements utilisent fréquemment deux outils: la loi et l'impôt. Or, dans ce cas, ces outils nous évitent hélas de nous poser deux questions fondamentales: pourquoi les humains sont-ils de

mauvais conducteurs? Et comment pouvons-nous y remédier?

L'une des raisons pour lesquelles les humains sont de mauvais conducteurs est qu'ils n'arrivent pas à maintenir un niveau de vigilance élevé et constant. Cette incapacité est une «infirmité» qui distingue les humains des machines. Une machine ne se fatigue jamais de vérifier, encore et encore, la distance avec le véhicule qui la précède; à l'inverse, un humain qui doit répéter une même tâche un grand nombre de fois se lasse, s'engourdit, relâche son attention, etc. De plus, une pensée ou une émotion peut le distraire. Enfin, son esprit est incarné dans un substrat biologique beaucoup moins stable que le substrat électronique d'un ordinateur: la faim, la soif, la fatigue, etc. affectent aussi son niveau de vigilance.

Nous pouvons donc certes limiter la vitesse sur les routes et inciter, par des amendes, les conducteurs à respecter ces limitations, ce qui atténue les effets de leur inconstance. Mais une autre solution serait de remplacer les conducteurs par des ordinateurs, comme c'est déjà le cas dans les métros ou les avions.

Bien entendu, conduire une voiture est plus difficile que conduire un métro, car l'interaction avec l'environnement est beaucoup plus complexe, ce qui explique que, malgré leur vigilance constante, les véhicules autonomes provoquent eux aussi parfois des accidents. Cela justifie peut-être des solutions hybrides – régulateurs de vitesse, détecteurs d'obstacles, etc. – dans lesquelles l'ordinateur assiste le conducteur sans le remplacer. Mais qu'ils soient autonomes ou hybrides, ces véhicules pourraient être plus systématiquement déployés, afin de diminuer le nombre d'accidents. Cette manière de résoudre les problèmes, non par une loi ou un impôt, mais en s'appuyant d'abord sur le progrès des techniques, enrichirait la palette des outils utilisés pour gouverner. ■

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

Découvrez notre hors-série numérique

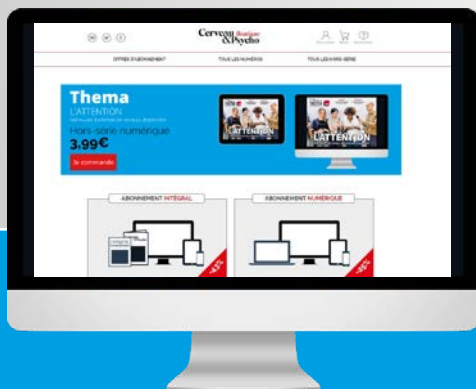
L'ATTENTION

RETROUVEZ DU TEMPS DE CERVEAU DISPONIBLE

3,99 €



80 pages de lecture
pour tout savoir sur le sujet



Les *Thema* sont une nouvelle collection de hors-séries numériques. Chaque *Thema* contient une sélection des meilleurs articles sur un sujet.

- 1 Commandez le *Thema* sur **boutique.cerveauetpsycho.fr**
- 2 Rendez-vous sur votre compte client, dans la rubrique **Ma bibliothèque numérique**
- 3 **Téléchargez le PDF** directement depuis votre tablette, téléphone ou ordinateur
- 4 Bonne lecture !

Rendez-vous sur :
boutique.cerveauetpsycho.fr



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

AMBIGUÏTÉS IDENTITAIRES

Les attitudes vis-à-vis des robots humanoïdes, de la viande de synthèse ou des humains génétiquement modifiés posent une même question : de quoi est faite notre identité ?



Qu'y a-t-il de commun entre un robot humanoïde, un steak végétal et un embryon humain génétiquement modifié? L'obtention de ces éléments soulève d'incessants débats sur ce qui compose notre identité.

Ainsi, les robots dont l'apparence rappelle celle d'un humain interrogent notre relation vis-à-vis de non-humains qui nous ressemblent sur le plan des réactions verbales ou de la mobilité. Des poupées sexuelles aux robots de compagnie pour personnes âgées, attribuer une intention, voire des sentiments, à un objet inanimé est inévitable. Ce fut le cas avec la vidéo d'un robot reproduisant à la perfection la nonchalance d'une démarche humaine, mise en ligne l'été dernier: pourtant pure production numérique, cet humanoïde a fait le tour de la twittosphère en suscitant l'angoisse d'une prise de pouvoir par des intelligences artificielles.

On retrouve une dualité identitaire analogue avec le steak végétal. Le 25 octobre 2018, en France, le Conseil

constitutionnel a censuré une disposition de la loi Agriculture et alimentation, qui interdisait l'usage de dénominations liées aux produits d'origine animale pour promouvoir ceux d'origine végétale. Le *steak végétarien*, la *saucisse végétale* ou le *fromage sans lait* avaient en effet fait l'objet d'un débat parlementaire au motif que ces intitulés biaisaient les pratiques commerciales.

La plupart des consommateurs se méfient de la viande *in vitro* en raison de son artificialité

La viande *in vitro*, ouverte depuis peu à la commercialisation aux États-Unis, suscite un trouble ontologique encore plus prononcé. Produite en laboratoire à partir de cellules souches musculaires de bovins, une telle viande évite de tuer des animaux. Mais la plupart des consommateurs

éprouvent une méfiance, sur un plan tant gustatif que sanitaire, à l'égard de l'artificialité de son mode de fabrication.

La médecine abonde également de cas qui interrogent l'identité biologique. Ainsi, l'annonce en novembre 2018 de la naissance de bébés chinois dont on avait modifié le génome a suscité un tollé mondial. Dans de telles questions, on voit s'opposer deux attitudes: certains associent l'identité biologique à l'acquisition d'un génome spécifique, tandis que d'autres s'opposent à son essentialisation et tolèrent, dans certains cas, l'édition du génome de lignée germinale.

L'acceptabilité sociale de ces trois exemples touchant l'univers de la robotique, de l'alimentation ou de la médecine ne sera pas facile à construire. Une ontologie flottante les réunit: humain/non humain; carné/non carné; génome hérité/génome acquis.

Un problème moderne lié à l'intervention humaine sur la matière vivante, me direz-vous? Et pourtant... la mythologie avait déjà formalisé cette tension identitaire. Dès l'Antiquité, circulait la légende du bateau de Thésée, héros célébré pour avoir vaincu le Minotaure. Conservé au port d'Athènes en hommage à ses exploits, le bateau aurait été régulièrement entretenu par le remplacement de ses pièces défectueuses, à en croire Plutarque. Malgré le changement de *matière*, les Athéniens estimaient qu'il s'agissait du même bateau, puisque sa *forme* a été préservée. Mais d'autres considéraient que ce sont les planches de bois originelles, retirées lors des renovations, qui constituaient la véritable identité du bateau.

Si l'on revient à nos moutons, est-ce la *forme* (l'apparence du robot, l'aspect du steak, l'expression humaine) ou la *matière* (caractère biologique, carné ou génomique) qui détermine l'identité? Le paradoxe de Thésée révèle un chemin inattendu pour expliquer la défiance sociale et l'irréductibilité de certaines controverses contemporaines: l'ambiguïté identitaire.

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

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE3 FORMULES
À CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,86€ -29 %	79€ Au lieu de 114,40€ -31 %	99€ Au lieu de 174,10€ -43 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

Je choisis ma formule (merci de cocher)

FORMULE
DÉCOUVERTE

12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,86€

FORMULE PAPIER
HORS SÉRIE12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

FORMULE
INTÉGRALE12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,10€

2/ l'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3/ Je choisis mon mode de règlement

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

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

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

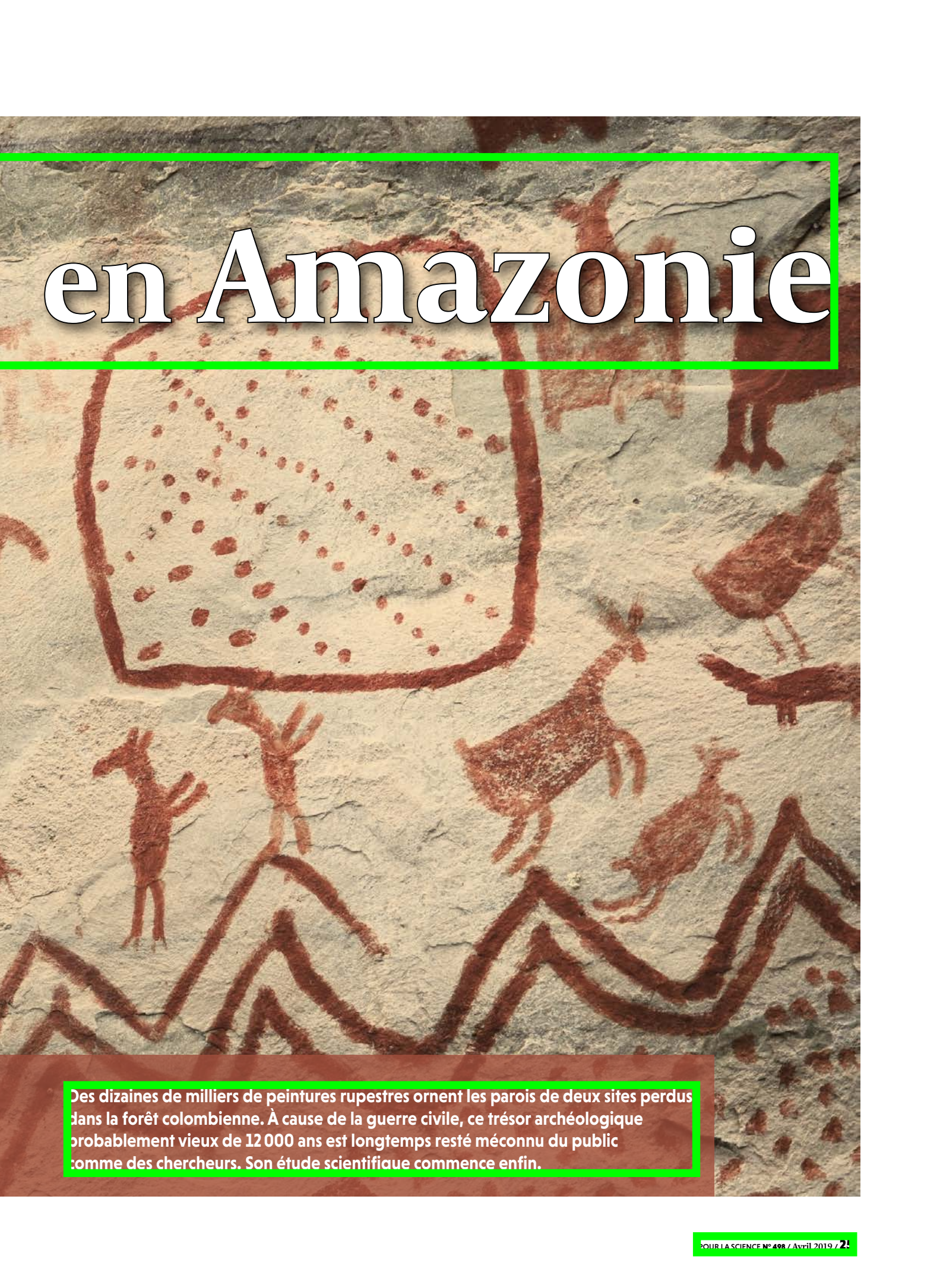
Signature obligatoire :

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.

Un Lascaux

Les dessins abstraits entourent les représentations animales et semi-humaines font partie d'un énorme patrimoine rupestre ancien perdu dans la forêt.



en Amazonie

Des dizaines de milliers de peintures rupestres ornent les parois de deux sites perdus dans la forêt colombienne. À cause de la guerre civile, ce trésor archéologique probablement vieux de 12 000 ans est longtemps resté méconnu du public comme des chercheurs. Son étude scientifique commence enfin.

PRÉSENTATION

Des dizaines de milliers de dessins ornent des abris-sous-roche à Chiribiquete et à la Lindosa, deux sites d'Amazonie colombienne.

Leurs origines et leurs âges sont incertains, même si des datations suggèrent que nombre de pictogrammes sont très anciens.

Situées en des lieux peu accessibles et inhabitables, ces représentations évoquant humains, plantes, animaux, êtres hybrides ou motifs géométriques semblent avoir des significations mythologiques.

L'immense travail nécessaire à leur interprétation se poursuit.

MAINTENANT

STEPHEN ROSTAIN, archéologue au CNRS et au laboratoire Archéologie des Amériques de l'université Panthéon-Sorbonne



Du rouge partout ! Une demi-heure d'ascension vers la falaise sur une pente extrêmement raide a cloué mon regard au sol, mais, parvenu sous la frondaison dissimulant le pied de la falaise, je peux enfin relever la tête. Mon champ visuel est alors brusquement rempli par des dizaines de pictogrammes rouges répartis sur 30 mètres de paroi et 10 mètres de haut. Ces énigmatiques glyphes rouges représentent des vampires, des serpents, des oiseaux, des tapirs, des jaguars, des danseurs, des chasseurs... La variété des styles graphiques – personnages-bâtons, silhouettes à peine esquissées ou figurations très réalistes – suggère que des cultures variées ont contribué à cette œuvre complexe. Parfois, les motifs se superposent, preuve d'une réutilisation régulière du support rocheux qui, lisse et clair, semble avoir été préparé avant d'être peint.

Avec Ernesto Montenegro, le directeur de l'Icanh (*Instituto colombiano de antropología e historia*), André Delpuech, le directeur du musée de l'Homme, à Paris, et Gautier Mignot, ambassadeur de France, nous sommes en Colombie face à l'une des falaises peintes de la zona arqueológica de la Lindosa, la « montagne de la Belle ». Ce petit aréopage est venu découvrir ensemble l'art pariétal de la Lindosa en pleine Amazonie. Avec celui de Chiribiquete,

l'Unesco vient de classer ce site au Patrimoine mondial de l'humanité. Avant de nous retrouver face à ce trésor rupestre, il nous a fallu faire plus de douze heures de voiture depuis Bogotá, la capitale, pour rejoindre la localité de San José dans le département du Guaviare; de là, nous avons fait quelques heures de pirogue, puis roulé pendant deux heures à travers la forêt dans une voiture tout-terrain avant que, finalement, une rude ascension nous mène jusqu'à cet abri-sous-roche.

Enigmatique, la multitude des représentations forme un chaos sur la paroi. La couleur rouge de la plupart des peintures ne m'étonne guère, tant je sais l'omniprésence des oxydes de fer dans les basses terres de l'Amérique du Sud; je note cependant que du noir apparaît

Des combats contre les Farc avaient lieu non loin de la Lindosa



ans quelques rares œuvres. Surtout, la très bonne conservation des peintures, malgré la puissance de la pluie et du vent amazoniens, attire bien plus mon attention. La fraîcheur de certaines d'entre elles est même sidérante: il semble que les artistes aient mis au point un mélange de pigments et de matières adhésives capables de résister des millénaires durant...

La Lindosa comporte une dizaine d'abris-sous-roche ornés de milliers de peintures. Les datations prouvent un usage très ancien du site, nous apprennent nos guides colombiens. Et l'ethnologue Carlos Castaño Uribe, qui a exploré et étudié le site de Chiribiquete, annonce pour sa part pas moins de 70000 dessins, dont certains, clame-t-il, seraient très anciens. Les vestiges archéologiques attestent d'un long usage des deux sites pendant la préhistoire. Bref, la Colombie arbore une sorte d'immense «Lascaux de l'Amazonie».

Comment a-t-on pu passer à côté d'un patrimoine pictural aussi important? La principale raison est qu'il est resté pendant des décennies aux mains d'une armée dissidente et de bandes criminelles. La guerre entre les Forces armées révolutionnaires de Colombie (Farc) et le gouvernement colombien, qui a fait des centaines de milliers de morts et déplacé des millions de Colombiens, a fait peser une chape de terreur sur toute la région. Pour se financer par le trafic de cocaïne, les révolutionnaires collaboraient

avec les narcotrafiquants. Tous avaient des bases dans la forêt. Étant donné les combats qui eurent lieu non loin de la Lindosa et le fait que la forêt soit hantée par les narcotrafiquants et les Farc, il était peu envisageable d'envoyer des chercheurs dans la région. Cette situation a perduré pendant la plus grande partie de la seconde moitié du xx^e siècle et n'a vraiment pris fin qu'en 2017.

LA PREMIERE MERVEILLE DE L'AMAZONIE

Personnellement, j'ai appris l'existence de Chiribiquete en éditant le livre *Las Siete Maravillas de la Amazonía Precolombina* («Les Sept Merveilles de l'Amazonie précolombienne»). Quelle n'a pas été ma surprise quand la spécialiste de l'art rupestre brésilien Edithe Pereira consacra un chapitre entier à ce mystérieux site. Prenant conscience de l'existence d'un énorme patrimoine rupestre en Amazonie colombienne, j'ai alors eu du mal à croire qu'il ait pu rester ignoré aussi longtemps. C'est alors que j'ai découvert... ses découvreurs.

Le premier Occidental qui mentionna Chiribiquete fut sans doute le botaniste américain Richard Schultes. Envoyé en Amazonie en avril 1943 en quête de forêts d'hévéas, il remonta la rivière Macaya et tomba sur «les montagnes quartzitiques isolées de Chiribiquete, sentinelles d'un passé mystérieux». Alors qu'il en

L'Amazonie du nord est parsemée de montagnes-colonnes résultant de l'érosion continue, pendant des dizaines de millions d'années, d'un ancien haut plateau sédimentaire: les *mesas*. Les piémonts de ces «tables» sont peu accessibles et très inhospitaliers. C'est là, sur les falaises et dans des abris retirés, que, pendant très longtemps, les chasseurs-cueilleurs ont peint. Ci-dessus, l'une des formations rocheuses du parc national de Chiribiquete.

explorait une particulièrement impressionnante et « enveloppée de légende dans l'esprit des indiens » – le Cerro de la Campana, le « mont de la cloche » –, il remarqua sur les falaises et dans les abris-sous-roche des mosaïques chaotiques de représentations de gens, de chamanes, de chasseurs, de danseurs et d'animaux. Ignorant que nombre de ces peintures étaient anciennes, il les attribua très généralement « aux Indiens ».

Et le premier auteur européen à mentionner la Lindosa fut l'explorateur français Alain Gheerbrant, qui, entre 1948 et 1950, dirigea l'expédition Orénoque-Amazone. Avant de descendre l'Orénoque et de passer la Sierra Parima, une chaîne de montagnes séparant le Venezuela du Brésil, il traversa la région du futur San José de Guaviare et y rencontra des Guayaberos, qui lui parlèrent d'un site rupestre. Passant « cinq jours à la Lindosa où [il releva] les peintures malheureusement très effacées », il mentionna ses observations dans son célèbre livre *L'Expédition Orénoque-Amazone*.

DES MONTAGNES PERDUES NON MENTIONNÉES SUR LES CARTES

Toutefois, si l'importance de ces sites a fini par s'imposer aux préhistoriens sud-américains, c'est grâce aux efforts déployés par Carlos Castaño Uribe pour étudier Chiribiquete. Directeur de l'organisation des parcs nationaux colombiens à la fin des années 1980 et dans les années 1990, il raconte qu'après un décollage de San José de Guaviare, le petit avion qui l'amenait visiter un parc lointain « avait dû prendre cap au sud pour éviter une tempête, quand une chaîne de montagnes absolument inconnue, et non mentionnée sur les cartes d'alors, apparut à l'horizon. Même si certaines personnes la connaissaient déjà, ce fut une révélation, et pour moi, la découverte. » Dès 1989, il fit déclarer la région de Chiribiquete « zone à protéger » puis organisa huit expéditions sur place. Lors de l'un des premiers séjours, son équipe, après d'énormes difficultés, parvint à une paroi ornée de plus de 20 000 représentations; elle découvrit ensuite 58 abris-sous-roche ornés différents.

La difficulté d'exploration des deux sites rupestres du Guaviare s'explique par leur

Le grand panneau peint de la Lindosa pourrait être le produit complexe des activités rituelles de peinture accomplies au cours de nombreuses visites dans un même abri-sous-roche. Il mêle des motifs géométriques, des représentations d'animaux ou d'humains plus ou moins étranges et à des représentations mi-humaines, mi-animales. On ignore combien de peintres et de cultures successives ont contribué à la réalisation de cette œuvre et en combien de temps; les âges des très nombreux pictogrammes pourraient donc être très variés. Les traces de séjours humains découvertes au pied de ce panneau et d'autres abris-sous-roche de la Lindosa datent pour la plupart de quelques milliers d'années : quelques-unes remontent à 12 000 ans.





ocalisation. Les peintures de Chiribiquete et de la Lindosa sont en effet installées aux pieds de *mesas* (« tables »), de spectaculaires îles rocheuses dans la forêt que l'on nomme aussi *tepuy*, d'après un terme amérindien signifiant « montagne ». Très fréquents dans le nord de l'Amazonie, ces hauts plateaux aux parois verticales et abruptes émergeant de la canopée culminent parfois à 3000 mètres. Ils constituent les résidus de la destruction par la tectonique et par le ruissellement tropical d'un vaste bassin sédimentaire rehaussé il y a quelque 180 millions d'années par une vaste surrection. La lente mais inexorable dissolution du grès s'insure sans fin les *mesas* et y crée d'immenses réseaux de cavités.

Les *tepuy*s de la Lindosa et de Chiribiquete sont situés entre les Andes à l'ouest, les Guyanes à l'est, les savanes colombiennes au nord et la dense forêt tropicale d'Amazonie au sud. Ils ne dépassent pas 1000 mètres d'altitude, mais s'étalent souvent sur plusieurs kilomètres carrés. Les crevasses abyssales parcourues par des eaux sauvages colorées qui s'y succèdent à un rythme serré rendent leur accès très difficile et leur parcours acrobatique. D'autant plus que leurs roches nues battues par les vents sont entourées de sols pauvres, où un impénétrable maquis d'épines entoure de rares grands arbres.

Les *mesas* de Chiribiquete abritent une faune endémique originale, faites d'espèces particulières de colibris, de chauve-souris, d'escargots, d'insectes. La pauvreté de ces faunes et flores endémiques rappelle celles des faunes insulaires. Elle a rendu les *tepuy*s impropres à l'implantation durable de populations humaines; il semble ainsi que ces plateaux peu amènes n'ont jamais été habités par les Amérindiens.

Néanmoins, ces monstrueuses excroissances dans la forêt ont fasciné ces populations, tout autant qu'elles les ont effrayées. «Tous les Indiens [les Carijonas, qui vivaient alors dans la région] croient que des orages violents et des torrents peuvent être créés en frappant une certaine dalle légèrement érodée située près du sommet. Cette dalle émet un son de cloche quand on la frappe avec une autre pierre», a rapporté Schultes à propos du Cerro de la Campana. Le fait que les Pemons, un groupe amérindien du sud de l'État de Bolivar, au Venezuela, considèrent le *tepuy* Matawî comme étant le «lieu des morts», suggère qu'en Amazonie, les environs des *mesas* sont des lieux empreints d'une forte spiritualité. Tout ce que j'ai perçu des cultes chamaniques, très anciens en Amazonie sans doute, me suggère que ces montagnes inspirant crainte et respect n'ont été visitées que par des impérants de rites initiatiques, des chamanes ou des guerriers, bref par des personnalités bien préparées effectuant des visites dans un but initiatique ou rituel.



Oui, mais depuis quand? Si les peintures de la Lindosa et de Chiribiquete participent de rituels, le phénomène est-il ancien ou récent? En maints endroits, l'état d'effacement avancé des œuvres suggère un grand âge; en d'autres, des peintures étonnantes de fraîcheur pourraient dater elles aussi d'il y a longtemps... ou pas! De nouvelles datations disposons-nous à ce stade?

Les peintures de Chiribiquete montrent ce qui marque la vie d'un chasseur-cueilleur: des animaux. Toutefois, leurs représentations intègrent des symboles abstraits, qui pourraient être en rapport avec l'essence du phénomène de la vie. Le singe hurleur (*Alouatta*) en train de passer devant le panneau peint semble en faire partie.

LES DATATIONS, QUESTION ARDUE MAIS CRUCIALE

Pour le moment, les chercheurs colombiens qui ont étudié les deux sites n'ont pas daté directement les peintures. Quand, il y a trente ans, Gonzalo Correal, professeur de l'université nationale de Colombie, a dirigé de premières recherches à la Lindosa (vite interrompues par la guerre), son équipe a répertorié quelque 2000 pictogrammes d'aspect humain, végétal, animal ou géométrique dans sept abris-sous-roche. Mais elle n'a daté par le carbone 14 que la partie organique des milliers de vestiges découverts lors des fouilles. Outre des couteaux de pierre et autres outils lithiques servant à travailler le bois, à traiter les peaux ou le poisson, les chercheurs ont mis au jour des os et d'autres restes organiques, qui leur ont appris que les chasseurs-cueilleurs visitant les abris exploitaient toute une variété de palmiers, de tubercules et d'arbres fruitiers sauvages, et chassaient. D'après leur datation par le



carbone 14, les plus anciens passages à la Lindosa remontaient à 12 200 ans.

Depuis 2015, des fouilles ont repris à la Lindosa, dont « l'objectif principal, explique Gaspar Morcote Ríos, de l'université nationale de Colombie, qui les dirige, est d'établir quelle relation lie les abris de la Lindosa aux plus anciens habitants de la forêt tropicale humide amazonienne, où les plus anciennes occupations connues datent d'environ 12 000 ans ». Un objectif que des datations directes des œuvres de la Lindosa aideraient beaucoup à atteindre...

S'agissant de Chiribiquete, les seules datations dont nous disposons à ce stade sont celles réalisées par Carlos Castaño Uribe. Donnant en décembre 2015 une des conférences TED à Bogotá, il expliquait : « Nous avons trouvé les plus anciennes preuves de présence humaine sur le continent : des peintures vieilles de 22 000 ans, dont les âges sont clairement identifiés par 74 datations par le carbone 14 associées à des restes de peinture. »

Il s'agit là d'une affirmation énormissime, qui ne peut qu'apparaître problématique au préhistorien. Pourquoi ? Selon le modèle du peuplement des Amériques le plus accepté et le mieux corroboré à la fois par les datations et par la paléogénétique, les Béringiens, c'est-à-dire les chasseurs-cueilleurs asiatiques à l'origine des Amérindiens, ont longtemps piétiné en Alaska et sur le territoire émergé qui reliait l'Asie à l'Amérique au cours du dernier maximum glaciaire (la Béringie). Le retrait des glaces n'a rendu praticable le passage côtier vers le sud qu'il y a quelque 16 000 ans avant le présent (le présent étant défini par convention comme l'année 1950). Ces populations de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs ont alors longé la côte occidentale américaine, à partir desquelles elles ont ensuite investi les continents. En Amérique du Sud, l'équipe de Tom Dillehay, de l'université de Nashville, dans le Tennessee,

a identifié et daté à 14 800 ans avant le présent une occupation humaine sur le site de Monte Verde au Chili. Après de longues et âpres discussions, cet âge est aujourd'hui admis.

Les groupes qui ont investi les basses terres orientales sont donc présumés l'avoir fait à partir d'il y a environ 15 000 ans. Cependant, une controverse sur l'occupation de ces terres existe depuis qu'en 1994, Águeda Vilhena Vialou, attachée au Muséum national d'histoire naturelle, a fouillé l'abri-sous-roche de Santa Elina, au Mato Grosso, et l'a daté vers 23 000 ans avant notre ère. Même situation s'agissant du site de Pedra Furada, dans l'État brésilien du Piauí, où des fragments charbonneux ont été datés par le carbone 14 entre 32 000 et 60 000 ans, ou encore dans le même État à Toca da Tira Peia, où des artefacts présumés humains ont été mis au jour dans une strate datée de 22 000 ans.

Selon les critiques de ces datations, les artefacts présumés ne seraient pas humains ; les charbons de bois trouvés seraient d'origine naturelle ; et les peintures ne pourraient être associées aux datations. Cela démontre la rigueur exigée avant que ces âges ne soient acceptés. De même, les âges avancés par Carlos Castaño Uribe pour Chiribiquete semblent impossibles à concilier avec le modèle du peuplement des Amériques. De fait, 22 000 ans est exactement l'âge de la Blue Fish Cave, dans le Yukon, au Canada, qui, après trente ans de lutte acharnée des archéologues québécois qui l'ont fouillée, est enfin considérée comme le plus ancien site archéologique américain.

Il faudra donc effectuer de nouvelles datations à Chiribiquete et vérifier celles de Carlos Castaño Uribe, qui, pour le moment, n'ont pas été publiées dans une revue scientifique, mais seulement sur une page internet intitulée *Tradición cultural Chiribiquete* (« tradition culturelle de Chiribiquete »). Pour ce faire, le mieux serait de dater directement les œuvres après avoir découvert dans les pigments des composants organiques datables par le radio-carbone (charbon, pollens...). Si c'est impraticable, une autre possibilité serait de rechercher au pied des parois des objets porteurs de peinture et emprisonnés dans un niveau archéologique.

Pour l'instant, nous ne disposons que de datations de charbons de bois et d'ossements découverts dans des fosses creusées dans les abris ornés de la Lindosa. Elles indiquent que certaines occupations des sites sont récentes, mais que la plupart s'étalent sur les dix derniers millénaires, et que quelques-unes atteignent 12 200 ans. Même si les peintures ne sont pas encore datées directement, les constatations archéologiques faites invitent à les interpréter en les présumant aussi anciennes que les occupations.

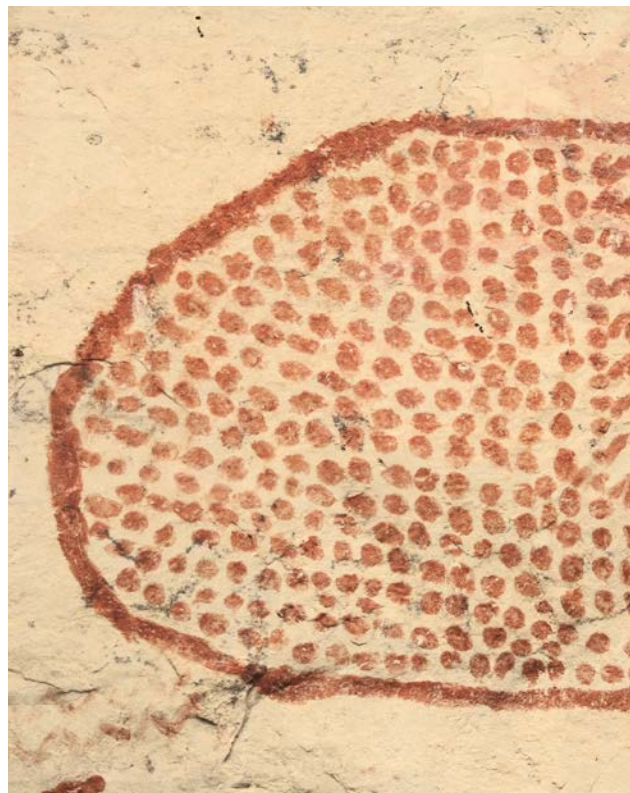
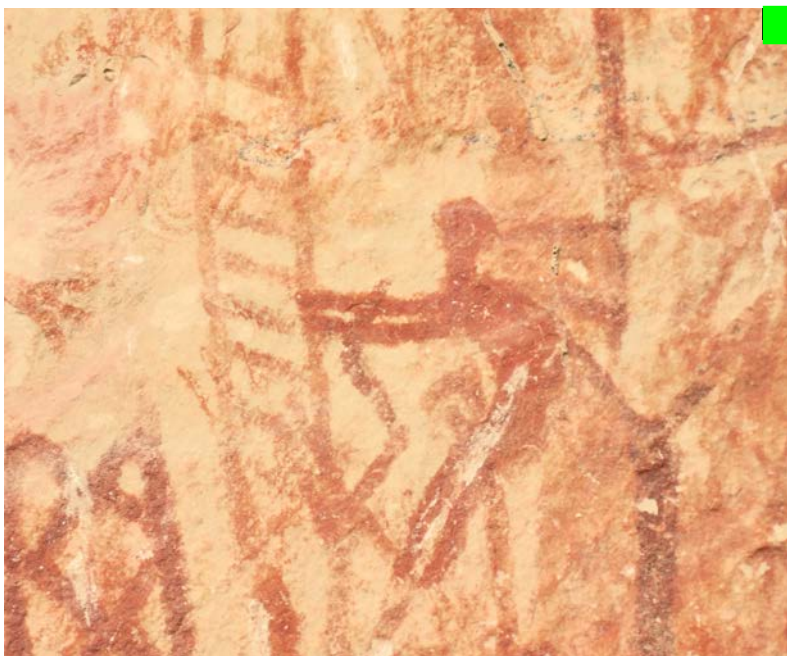
Certaines occupations des sites sont récentes, mais la plupart s'étalent sur les dix derniers millénaires

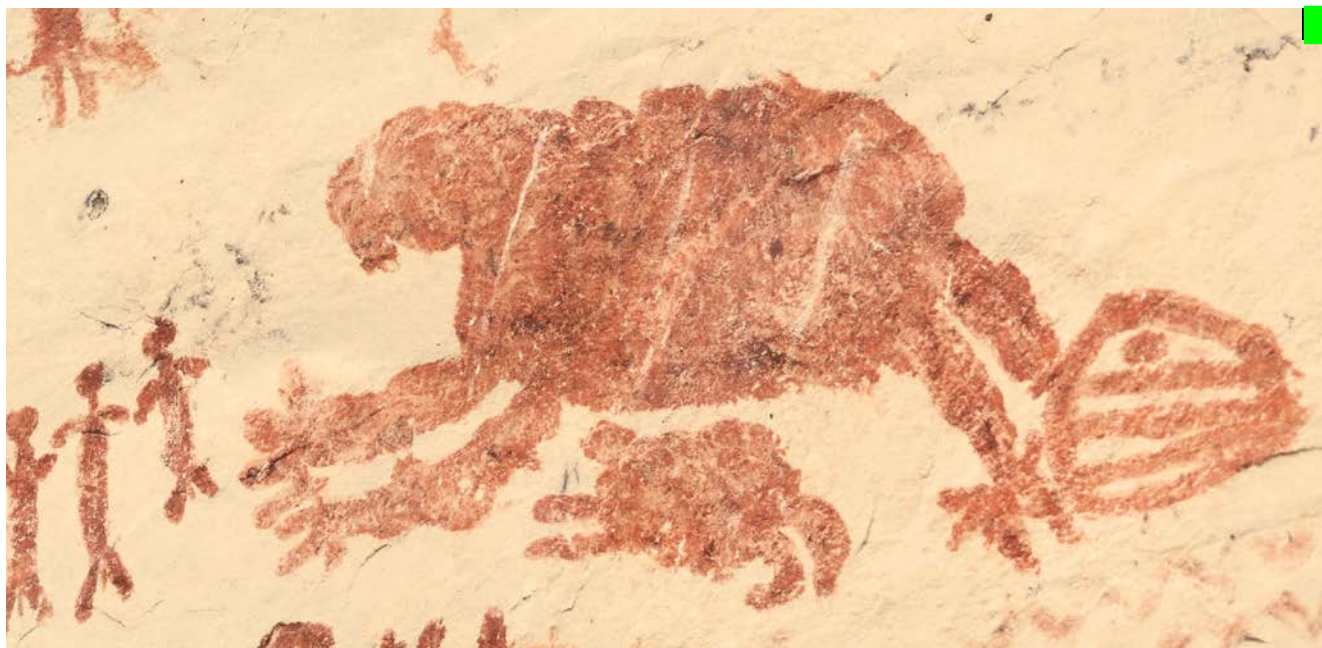
D'ÉTRANGES ANIMAUX MYTHIQUES

Les animaux représentés sur les parois de la Lindsa et de Chiribiquete semblent normaux, mais à y regarder de plus près, une certaine ressemblance avec les créatures mythologiques.

En voici un échantillon. (1) et (2) : un iguane et une chauve-souris (vampire), ce dernier étant un acteur prépondérant de mythologies amérindiennes. (3) : certains croient reconnaître dans cette forme animale le cheval d'un conquistador, mais les boutsendus de ses pattes font plutôt penser à un sanglier, voire à un tapir vu de profil. (4) : un personnage grimpe à une échelle... vers le ciel.

hème très commun dans les mythes amérindiens ? (5) : cet étrange animal serait pour certains un mégathérium, mammifère disparu il y a 11 000 ans, mais l'absence de queue et les mains quasi humaines contredisent cette idée. (6) : ceux qui identifient dans ce glyphe un anaconda ne tiennent pas compte de ses pattes et de ses cornes... (7) : un motif géométrique non élucidé est accompagné d'impressions de mains. (8) : un groupe d'hommes thyphalliques (en érection), trois portant dans le dos des ornements de plumes, dansent au-dessus d'êtres mythologiques non identifiés.





Malheureusement, l'interprétation que Carlos Castaño Uribe a développée après ses expéditions n'a été publiée elle aussi que très partiellement sur la page internet *Tradición Cultural Chiribiquete*. Que dit-il? «À en juger par ses caractéristiques pictographiques et chronologiques, Chiribiquete est un site qui offre de magnifiques occasions de recherche sur la symbolique, la cosmogonie et l'iconographie de la région colombienne et néotropicale. Chiribiquete ouvre une fenêtre de compréhension des processus culturels entre la fin du Pléistocène jusqu'aux époques ultérieures, ce qui nous relie peut-être aux habitants historiques de sa région.»

Pleistocène? Cette ère géologique, qui débute il y a 2,58 millions d'années, se termine il y a quelque 12000 ans. Ce que suggère Carlos Castaño Uribe, c'est donc que les Carijonas, les habitants de la région de Chiribiquete au début du xx^e siècle, étaient les dépositaires d'une très ancienne tradition picturale poursuivie depuis le Pléistocène. Pour lui, l'art rupestre de Chiribiquete reflète une très ancienne pensée chamanique, qui s'est développée depuis l'arrivée des humains en Amazonie. Les nombreuses représentations de jaguar, qu'il veut reconnaître à Chiribiquete, jouent un grand rôle dans sa proposition.

Il sera malheureusement difficile d'interroger les traditions des Carijonas pour mettre à l'épreuve cette idée, puisque les guerres entre Amérindiens, mais surtout leur réduction massive en esclavage par les *caucheros* (les extracteurs de caoutchouc) les ont exterminés au point que dans le département du Guaviare, il n'en reste que quelques familles. Comme, en plus, elles ont été intégrées par le gouvernement à une autre ethnie indienne, que reste-t-il de fiable de leur mémoire ancestrale?

UNE PRATIQUE PICTURALE ENCORE PRÉSENTE?

Des indices actuels soutiennent cependant la proposition de Carlos Castaño Uribe: son équipe a découvert à Chiribiquete des peintures murales récentes et des brûleurs rituels entourés d'empreintes de pieds humains. Le site pourrait donc être encore utilisé! Par qui? Carlos Castaño Uribe attribue ces traces de passage à des communautés isolées dans l'immense forêt colombienne, qui refusent d'entrer en contact avec le reste de la civilisation – des «groupes non contactés». Selon lui, il pourrait rester de tels groupes dans la région de Chiribiquete. S'il devait se confirmer que certains d'entre eux font toujours un usage rituel de Chiribiquete, nous pourrions avoir le cas jamais rencontré de continuation en un même site d'une pratique picturale s'enracinant dans la nuit des temps!

Quoi qu'il en soit, un préhistorien ne peut qu'envisager avec la plus grande prudence

ANIMISME ET UNIVERS

Une scène mythologique amazonienne – une allusion directe à la constellation d'Orion, très importante dans la cosmogonie amérindienne – semble représentée à la Lindosa. Dans le programme, on voit un dessin d'un homme, des singes, des serpents, des abribes par les membres démesurés d'une entité géante. La scène fait remonter à la mémoire le mythe amérindien des quatre singes qui, après leurs aventures terrestres, montèrent au ciel et y devinrent la constellation d'Orion. Leur disposition en trapèze reproduit celle de ses quatre étoiles extérieures. L'entité qui les couvre pourrait représenter la voûte céleste et le monde de l'au-delà.



toute proposition de continuité culturelle à Chiribiquete. Le lion Peugeot ressemble à la statuette dite de l'homme-lion découverte dans la grotte préhistorique d'Hohlenstein-Stadel dans le pays souabe. Peut-on dès lors considérer que le symbole de la marque au lion est l'aboutissement de la tradition culturelle des chamanes aurignaciens commencée il y a 40000 ans? Non!

Pour ma part, je me méfie de notre tentation à plaquer une vision occidentale sur l'art rupestre amazonien. Dans ces immenses ménageries iconographiques qui s'offrent au regard du visiteur, la tentation est grande de reconnaître ici un serpent, là une tortue, là un apir, et là encore un poisson, un cerf ou une chauve-souris. Certains, comme Carlos Castaño Uribe, y voient une majorité de jaguars; mais pour y parvenir, ils doivent omettre des particularités physiques qui démentent cette identification: queue courte, absence d'oreille, etc. D'autres reconnaissent des scènes de chasse.

Toutes ces propositions relèvent de critères occidentaux et me semblent faire fi des concepts métaphysiques sous-tendant

Pictographie amérindienne. Selon moi, mieux vaut bien écouter la vieille femme guayabero qui indiqua le site de la Lindosa à Alain Gheerbrant, qui racontant que « sur la pierre, me regardaient des gens, des animaux, des diables rouges ». Des diables autant que des humains ou des animaux ? Voilà qui suggère un sens mythologique !

De fait, les pictogrammes des parois de la Lindosa impliquent à la fois des animaux et des humains reconnaissables, mais aussi des êtres intermédiaires, des esprits, des végétaux, des maîtres de la nature et d'autres êtres vivants de ce monde et de l'au-delà... Les corps hypertrophiés des personnages humains ou animaux, leurs pieds bidactyles (voir pages 24-25), les membres démesurément longs (image page précédente), les boules situées au bout des pattes d'êtres indéterminés (image 8, page 33), les figures animales debout (pages 24-25), les serpents à pattes et cornes (image 6, page 33), etc., ne semblent correspondre à des qualités intérieures mises en exergue par une figuration symbolique, qui se retrouve peut-être par ailleurs dans les nombreux symboles abstraits utilisés tant par les peintres que par les chamanes des basses terres amazoniennes (voir la photographie ci-dessus). Cette façon de « socialiser l'environnement », c'est-à-dire de l'intégrer dans sa société, expliquerait les anomalies physiques de tant des êtres représentés.

Prenons du champ afin de tenter d'interpréter cet étrange lexique pictographique. Une clé possible est le système des quatre ontologies de l'anthropologue Philippe Descola. Dans son récent et fameux ouvrage *Par-delà nature et culture*, ce professeur au Collège de France identifie au sein de l'humanité quatre conceptions fondamentales de la composition du monde. Nous n'en évoquerons ici que deux : le naturalisme et l'animisme.

Dans le naturalisme, qui est l'ontologie dominante en Occident depuis la Renaissance, seul les êtres humains ont des « intériorités » (des consciences, des esprits, des âmes...). Toutes différentes les unes des autres, tandis que tous les êtres sont faits d'une seule et même « physicalité » (tout est fondamentalement un issu d'atomes). Dans l'animisme – répandu en Afrique, en Arctique, mais aussi en Amazonie – les humains, les animaux, les plantes, voire les objets sont dotés d'une intériorité, tandis que leurs physicalités diffèrent. Ainsi, un jaguar est physiquement très différent d'un perroquet, mais sous le pelage ou la plume, ces êtres sont des « personnes » au même titre que les humains, avec qui il est possible de communiquer. Pour moi, les pictogrammes de Chiribiquete et de la Lindosa figurent ces intériorités et relèvent d'une pensée animiste.

Les intériorités et les physicalités des êtres mythiques jouent logiquement des rôles dans les mythes amérindiens. C'est pourquoi on peut



Les dessins que trace dans le sable le chamane amazonien illustrent le grand rôle que jouaient encore récemment (ce cliché date des années 1960) les symboles abstraits dans la pensée mythologique et dans les activités religieuses des Amérindiens d'Amazonie.

enter de donner un sens à certaines scènes figurées, probablement les plus récentes, en allant puiser dans les mythes séculaires des cultures amérindiennes animistes. À La Lindosa, ces quatre hommes armés de propulseurs attaquant leur proie, cet être qui semble grimper à une échelle (voir l'image 4, page 32), ces quatre personnages qui paraissent en avoir ligoté un cinquième, ces quatre autres semblant maintenir les animaux avec des lassos, cette colonne de personnages tenant un long instrument double en main ou encore ces quatre animaux protégés sous les bras démesurés d'une étrange entité (voir l'encadré page précédente) pourraient être les fragments de mythes. En tout cas, la frappante récurrence de quatre personnages dans ces scènes fait sûrement écho à l'un de ces récits.

Démontrée par les anthropologues Gerardo Reichel-Dolmatoff et Dimitri Karadimas, l'omniprésence des motifs issus de la mythologie dans l'art amazonien actuel incite à le penser. Tout comme les troublantes analogies entre peintures et certaines pratiques rituelles amazoniennes contemporaines. Ainsi, les êtres insolites représentés à Chiribiquete rappellent fortement certains des masques-costumes utilisés de nos jours. Les bêtes représentées y portent ainsi des entités dansant sur leur dos, à l'instar des mythes actuels qui décrivent un monstre originel transportant les premiers humains et les esprits.

La recherche sur la Lindosa et Chiribiquete pourra suivre ces pistes ou d'autres. S'agissant d'un site d'importance mondiale, elle devra passer par des collaborations interdisciplinaires internationales. Riche d'une expertise reconnue dans l'art pariétal, la France pourrait s'impliquer dans celles que la Colombie va organiser pour poursuivre l'étude scientifique de la Lindosa et de Chiribiquete. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Rostain, **Amazonie – Les douze travaux des civilisations précolombiennes**, Belin, 2017.

J. Rostain et C. Jaimes Betancourt (dir.), **Las Siete Maravillas de la Amazonia precolombina**, Vº Encuentro Internacional de Arqueología Amazónica, Bonner Altamerika-Sammlung und Studien, Plural Editores, La Paz, 2017.

P. Descola, **Par-delà nature et culture**, Gallimard, 2005, réédité en 2015.

A. Gheerbrant, **L'Expédition Orénoque-Amazone**, Gallimard, 1952, réédité en 1993.

LESSSENTIEL

Les particules d'antimatière présentent une charge électrique opposée à leur alter ego de matière. Leur masse est supposée identique.

Si leur masse était négative, les antiparticules pourraient chuter à une vitesse différente dans un champ gravitationnel, voire « tomber vers le haut ».

Des expériences au Cern, près de Genève, testeront bientôt cette hypothèse.

La masse négative des antiparticules permet aussi de développer un modèle cosmologique original qui se passerait de la matière noire, de l'énergie noire et de la phase d'inflation.

L'AUTEUR



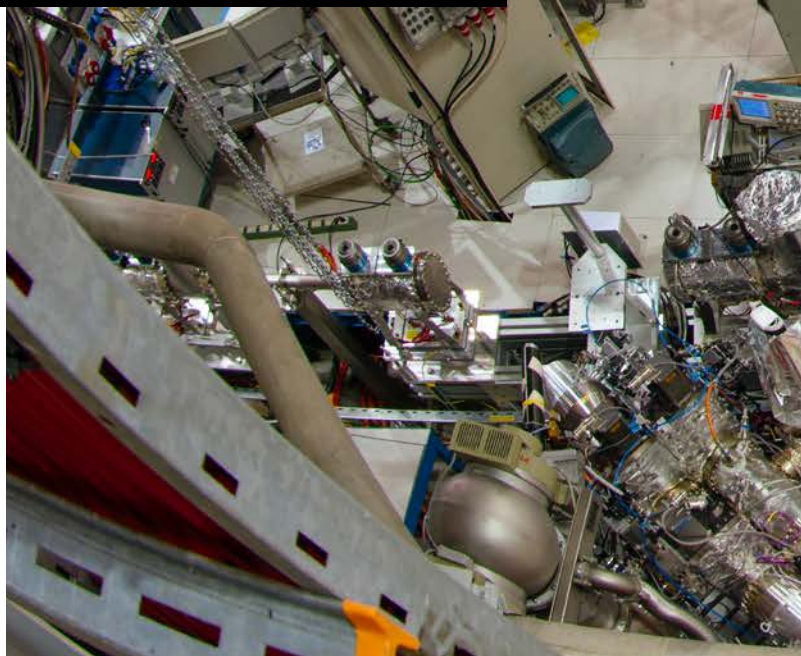
GABRIEL CHARDIN
Directeur de recherche au CNRS, où il préside le Comité des très grandes infrastructures de recherche

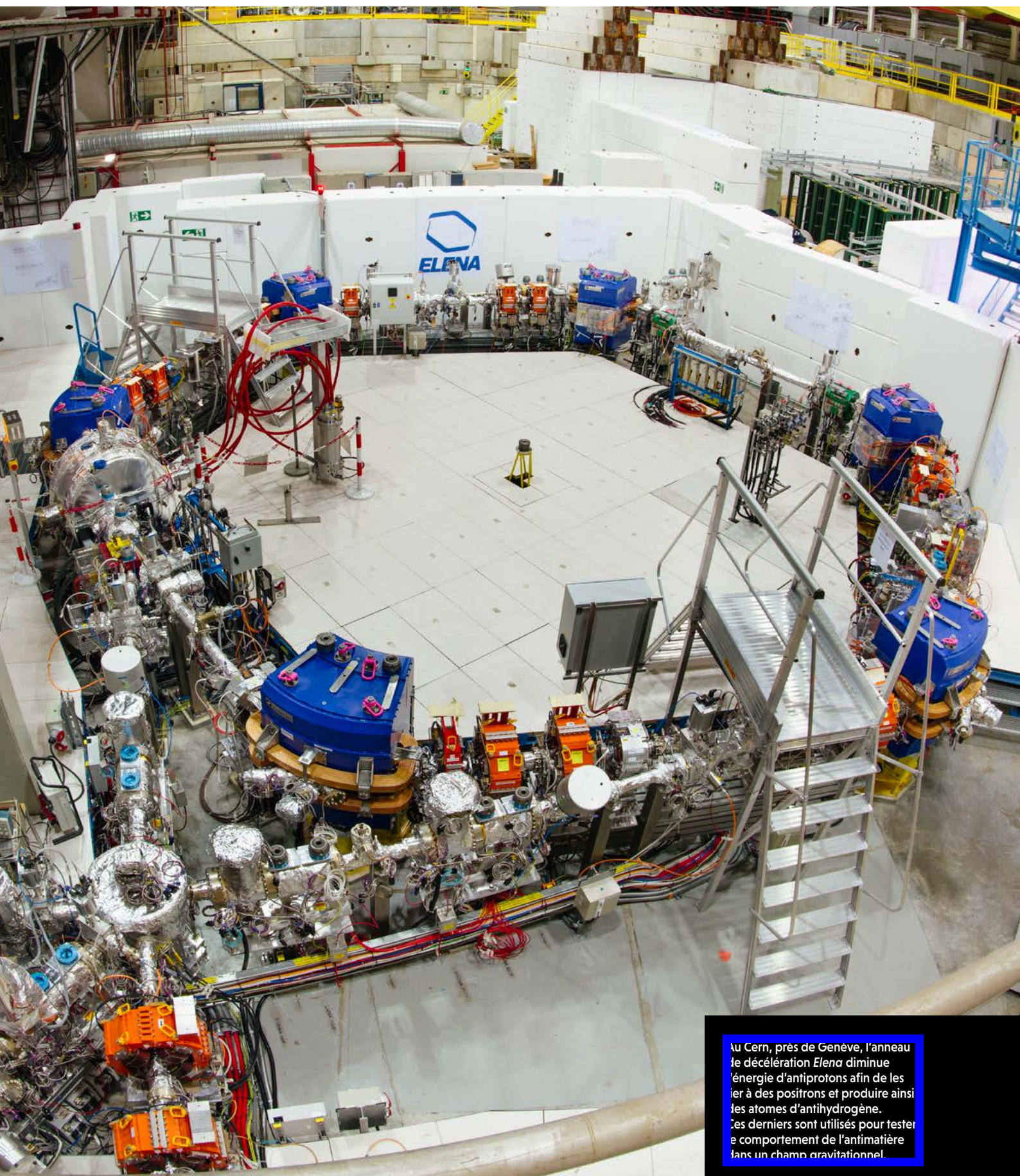
L'antimatière tombe-t-elle vers le haut?

Et si l'antimatière était de masse négative? En faisant cette hypothèse, il est possible de construire un modèle cosmologique qui n'a besoin ni de matière noire, ni d'énergie noire, ni d'inflation. Une hypothèse osée que les physiciens pourraient bientôt tester au Cern.

Dans l'anneau de 27 kilomètres de circonférence du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, les physiciens projettent les uns contre les autres des protons à des vitesses proches de celle de la lumière. Dans les « débris » de ces collisions à haute énergie, ils ont découvert le boson de Higgs et continuent d'explorer les lois qui régissent les interactions des particules. Ils ont ainsi mis à l'épreuve et validé avec une très bonne précision ce qu'on nomme le modèle standard de la physique des particules.

Mais à l'ombre du LHC, d'autres expériences, plus modestes par leur taille, explorent un pan encore mal connu du monde des particules, celui de l'antimatière. Celle-ci est en quelque sorte un





Au Cern, près de Genève, l'anneau de décélération *Elena* diminue l'énergie d'antiprotons afin de les ralentir à des positrons et produire ainsi des atomes d'antihydrogène. Ces derniers sont utilisés pour tester le comportement de l'antimatière dans un champ gravitationnel.

«miroir» de la matière qui compose tous les objets de notre quotidien, mais aussi la Terre, la Lune, le Soleil, etc. De nombreuses questions restent aujourd'hui sans réponse. Les antiparticules sont-elles un miroir parfait dont les propriétés seraient exactement l'inverse de celles des particules, ou peut-on mettre en évidence les différences? En particulier, comment une antiparticule se comporte-t-elle dans un champ gravitationnel? Tombe-t-elle exactement comme une particule de matière?

Le concept d'antimatière a émergé en 1928 sous l'impulsion du physicien anglais Paul Dirac, qui étudiait alors la physique quantique. À partir de l'équation qui porte son nom, il en a déduit que l'électron devait avoir un *alter ego*, nommé un peu plus tard positron, qui aurait la même masse, mais de charge électrique et d'énergie opposées. De fait, en 1932, l'Américain Carl Anderson a confirmé expérimentalement l'existence du positron en étudiant le passage de rayons cosmiques dans une chambre à brouillard.

Depuis, les physiciens ont découvert l'antiproton et bien d'autres antiparticules. Dans le cadre d'expériences récentes, ils associent même les positrons et des antiprotons pour former des atomes d'antihydrogène. Au Cern, les membres de l'expérience *Alpha-2* mesurent ainsi les propriétés spectroscopiques de l'antihydrogène et montrent, qu'aux incertitudes de mesure près, elles sont équivalentes à celles de l'hydrogène.

La relativité générale n'impose pas que les masses soient positives

En revanche, aucune expérience n'a encore réussi à comparer le comportement d'une particule et d'une antiparticule dans un champ gravitationnel. Cette mesure serait intéressante car, dans certaines théories qui voudraient dépasser le modèle standard, les antiparticules tomberaient à une vitesse différente des particules, voire «tomberaient vers le haut»! C'est ce phénomène que les expériences *AEgIS*, *ALPHA-g* et *GBAR* testeront dans les années à venir.

La grande majorité des physiciens pensent que la matière et l'antimatière devraient se comporter de la même façon, et que si des différences existent, elles sont extrêmement faibles. Mais si l'on observait un tel effet

d'antigravitation au Cern, les conséquences seraient *a priori* très importantes pour la cosmologie. Dans ce contexte, en 2006, j'ai commencé à étudier, avec Aurélien Benoit-Lévy, les implications cosmologiques d'un modèle qui suppose que les antiparticules ont des masses négatives. C'est ce que nous avons nommé le modèle de Dirac-Milne. Nous avons montré qu'un tel scénario, bien que très exotique, propose des solutions intéressantes en cosmologie.

EN CONFLIT AVEC LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE?

Pour commencer, il faut s'intéresser à la notion de masse négative qui, *a priori*, semble incompatible avec la relativité générale d'Einstein et, en particulier, avec le principe d'équivalence. Ce principe stipule que la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont égales. La première est liée à l'accélération dans la loi de Newton et exprime une résistance à une mise en mouvement ou un changement de direction dû à une force; la seconde est celle qui intervient dans la loi de la gravitation. En 2018, le satellite *Microscope* a testé et confirmé le principe d'équivalence avec une précision de l'ordre de 10^{-14} . Est-il alors possible d'avoir des masses négatives et de construire des théories compatibles avec le principe d'équivalence?

Dans les années 1950, le physicien d'origine autrichienne Hermann Bondi a montré qu'il était possible d'avoir des masses négatives et respecter le principe d'équivalence (la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont alors toutes deux négatives). Cependant, le comportement gravitationnel de ces particules était assez surprenant. Alors qu'une particule de masse positive attire les autres particules (qu'elles soient de masse positive ou négative), une particule de Bondi de masse négative repousse toutes les autres particules. Et en mettant en présence une particule de masse positive avec une particule de même masse mais négative, on obtient un mouvement de fuite en avant: les deux particules se poursuivent en accélérant tout en restant à distance (presque) constante. La plupart des physiciens considéraient ces configurations comme très exotiques, voire non physiques.

Par ailleurs, des théorèmes puissants semblaient exclure toute possibilité de modèle comprenant des masses négatives, ou plus généralement violant la positivité de l'énergie. En effet, si la relativité générale n'impose pas que les masses soient positives, l'introduction de masses négatives semble conduire à de graves problèmes d'instabilité.

Les physiciens ont longtemps pensé que ces théorèmes sur la positivité de l'énergie devaient être strictement respectés, mais plusieurs phénomènes ont mis en évidence des violations de ces énoncés. C'est le cas de l'effet Casimir, lié à

les fluctuations quantiques du vide, qui présente une densité d'énergie locale négative.

Mais c'est surtout la découverte de l'«énergie noire», en 1998, qui a remis en question les théorèmes sur la positivité de l'énergie. En étudiant les supernovæ de type Ia – associées à l'explosion d'étoiles naines blanches –, deux équipes d'astronomes ont montré que l'Univers pourrait être en expansion accélérée. Les cosmologistes ont expliqué cette dynamique en faisant l'hypothèse que l'Univers contient une grande quantité d'énergie noire, dont la nature reste à préciser. Dans ce cas, on peut montrer que certaines conditions de positivité de l'énergie sont violées aux échelles les plus grandes, celles du cosmos.

Par ailleurs, en 2014, Manu Paranjape et Saoussen Mbarek ont montré qu'il était possible, dans certaines conditions, de construire une configuration mathématique stable, une «bulle» de masse négative dans un univers en expansion comme le nôtre. Les obstacles à l'antimatière de masse négative ne seraient donc peut-être pas réels.

POLARISATION DU VIDE

En 1993, Richard Price, de l'université de l'Utah, a poursuivi l'étude des masses négatives au sens de Bondi dans un champ gravitationnel. Il a noté qu'une masse négative isolée tombe exactement comme une masse positive. En effet, la force gravitationnelle s'exerçant sur cette particule pointe vers le haut, du fait que la masse gravitationnelle est négative; mais l'accélération pointe vers le bas, la masse inertielle étant elle aussi négative.

Cependant, une particule n'est jamais vraiment isolée, ce qui pourrait entraîner des différences dans le mouvement des particules et des antiparticules. Richard Price a aussi remarqué qu'un système lié composé de deux masses identiques, mais de signes opposés, lévite. Et l'ensemble se polarise (voir la figure ci-contre), la masse négative se plaçant légèrement au-dessus de la masse positive dans le système en lévitation.

Or l'espace, même considéré comme vide, est le siège d'une intense activité de formation et disparition de paires particule-antiparticule à très courte durée de vie et dites virtuelles, en accord avec les lois de la physique quantique. Dès lors, une particule n'est jamais vraiment isolée: elle est entourée, ou «habillée», de particules et antiparticules virtuelles. Cet habillage, qui se polariserait comme Richard Price l'a noté, influencerait sur la façon dont une particule et une antiparticule tombent réellement dans un champ gravitationnel. Par ailleurs, des théories qui explorent des scénarios au-delà du modèle standard de la physique des particules (supersymétrie, théorie des cordes, etc.) introduisent des asymétries entre les particules et les antiparticules. La gravitation exercerait

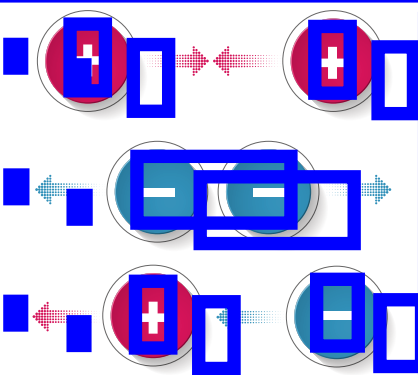
alors une force différente sur les unes et les autres. Si l'un de ces scénarios décrit correctement la nature, une antiparticule aurait un comportement inhabituel: elle tomberait à une vitesse différente d'une particule, voire vers le haut. Nous y reviendrons.

La polarisation du vide dans un champ gravitationnel, pointée par Richard Price, aurait aussi des conséquences à grande échelle, galactique et cosmologique. On s'attend à des effets importants surtout dans les régions où le champ gravitationnel est fort, comme au voisinage d'un trou noir. Mais il serait aussi possible de voir un effet dans les régions où le champ gravitationnel est plus faible, en particulier parce que cette polarisation modifie les lois de Newton pour les très faibles accélérations. Ce résultat n'est pas sans rappeler la théorie Mond (acronyme de *Modified Newtonian Dynamics*) proposée en 1983 par Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, pour résoudre le problème de la matière noire à l'échelle des galaxies.

DES COMPORTEMENTS SURPRENANTS

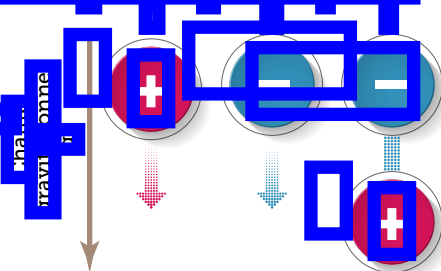
Dans l'hypothèse où les antiparticules ont une masse négative, leur comportement serait loin d'être intuitif. D'après les équations de la relativité générale, deux antiparticules se repousseraient tandis qu'une particule et une antiparticule tomberaient *a priori* de la même façon. Mais certaines théories suggèrent qu'il pourrait en être autrement, et des expériences sont menées pour mettre en évidence une anomalie dans la chute des antiparticules.

MOUVEMENT DES MASSES DANS LA THEORIE DE BONDI



En 1957, Hermann Bondi a montré que des masses négatives n'étaient pas exclues par la relativité générale. En revanche, si la force gravitationnelle entre deux masses positives est attractive (a, les deux masses se rapprochent), elle devient répulsive entre deux masses négatives (b, les deux masses s'éloignent). Et avec deux masses égales en valeur absolue, mais l'une positive et l'autre négative, les deux particules se poursuivent en maintenant toujours la même distance entre elles (c).

DANS UN CHAMP GRAVITATIONNEL



En 1993, Richard Price a montré qu'une masse positive et une masse négative tombent de la même façon dans un champ gravitationnel dans le cadre de la relativité générale (d et e). Si ces masses sont liées (comme dans une paire particule-antiparticule virtuelle du vide), l'ensemble lévite (f).

OU SE CACHE DONC L'ANTIMATIÈRE ?

Si l'Univers contient autant d'antimatière que de matière, comment l'Univers a-t-il survécu ?

Le Dirac-Milne proposé par Gabriel Chardin, où se cache donc l'antimatière ?

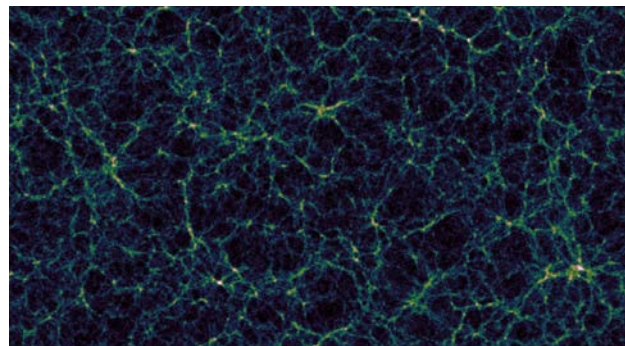
Des les années 1970, Roland Omnès, de l'université Paris-Sud, et ses collègues s'étaient intéressés à des univers symétriques matière-antimatière. La motivation était alors d'expliquer la densité de matière ordinaire (baryonique) dans l'Univers, et pourquoi nous ne voyons que de la matière et pas d'antimatière.

Les cosmologistes ont constaté que la densité de matière ordinaire est environ un milliard de fois plus faible que celle des photons. L'explication de ce fait serait que la matière et l'antimatière

se seraient annihilées mutuellement en produisant des photons durant la jeunesse de l'Univers. Un infime excédent de matière (un milliard et une particule de matière pour un milliard de particules d'antimatière) expliquerait pourquoi nous ne voyons que de la matière aujourd'hui. Or, juste après le Big Bang, la température considérable imposait des proportions égales de matière et d'antimatière.

Le modèle standard de la physique des particules présente de petites différences entre matière et antimatière qui permettent de passer d'une configuration symétrique à une autre asymétrique. Mais les effets sont trop faibles pour expliquer les observations. Roland Omnès a alors étudié un mécanisme par lequel matière et antimatière se seraient séparées à la façon d'une émulsion, quand l'Univers était âgé d'environ 10 microsecondes.

Le scénario n'est pas sans tenue de problèmes. Aux frontières des domaines, les fréquentes annihilations particule-antiparticule devraient se produire et



Cette simulation de la formation des grandes structures de l'Univers montre que la matière s'accumule en filaments (où se trouvent les galaxies) autour de vastes zones vides. Ces dernières sont-elles occupées par l'antimatière ?

mettre un rayonnement gamma, détectable par le télescope spatial Fermi. Mais cette émission n'a pas été observée.

Qu'en est-il du modèle de Dirac-Milne ? Au début, la matière et l'antimatière sont mélangées et s'annihilent. Ils forment progressivement des domaines distincts, qui restent encore en contact. L'annihilation aux frontières s'arrête lorsque l'Univers se refroidit et atteint une température d'environ 300 000 kelvins. Les domaines sont alors assez séparés. La matière s'effondre gravitationnellement et forme

des grandes structures (voir l'image ci-dessus). L'antimatière, avec sa masse négative, tend à s'étendre au maximum tout en étant repoussée par la matière. Elle occuperait aujourd'hui la très grande majorité du volume de l'Univers sous la forme de nuages de gaz froid dans les régions qui nous paraissent vides.

Reste que l'estimation de la densité baryonique dans les domaines de matière est loin d'être simple. Elle dépend de nombreux détails du modèle, comme la température où les quarks et les gluons s'associent en protons et neutrons.

De quoi s'agit-il ? Dans les années 1970, en mesurant les vitesses de rotation au sein des galaxies spirales, les astrophysiciens ont remarqué que les objets les plus éloignés du centre galactique évoluaient à des vitesses trop élevées par rapport à la masse estimée de la galaxie. Le champ gravitationnel galactique semblait alors trop faible pour retenir ces objets, qui auraient dû être éjectés de leur galaxie. Des chercheurs ont alors avancé l'hypothèse que les galaxies sont entourées d'un halo de matière, invisible et interagissant peu ou pas du tout avec la matière ordinaire, nommée matière noire. La masse du halo de matière noire augmenterait l'intensité du champ gravitationnel de la galaxie et retiendrait alors les objets périphériques.

Cependant, la nature de la matière noire reste à déterminer. Et les efforts pour la détecter grâce à des expériences sur Terre (j'ai moi-même contribué à lancer l'une d'elles, *Edelweiss*, installée depuis 1993 dans le laboratoire souterrain de Modane, en Savoie) n'ont rien donné jusqu'à présent.

Mordehai Milgrom a proposé une autre solution au problème de la dynamique des galaxies: modifier la dynamique newtonienne

quand l'accélération est très faible, ce qui est le cas dans les régions les plus lointaines des galaxies. Cette approche restitue parfaitement les courbes de rotation des galaxies. Mais il reste à comprendre d'où proviendrait cette modification des lois de Newton.

En 2009, Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, et Alexandre Le Tiec, de l'observatoire de Paris, ont étudié un modèle de matière noire qui se polarise en présence d'un champ gravitationnel. Ils ont retrouvé un comportement équivalent à celui de la théorie de Mordehai Milgrom, mais le modèle ne précise pas la nature exacte de cette matière noire. Or dans le scénario que j'étudie, où l'antimatière est de masse négative, on retrouve ce comportement de polarisation dans un champ gravitationnel. Les estimations de la densité de paires virtuelles dans le vide sont compatibles avec les contraintes du modèle de Luc Blanchet et d'Alexandre Le Tiec. Il reste cependant à réaliser des calculs plus précis pour s'assurer que l'on retrouve bien le comportement de Mond.

Nous n'en sommes qu'au début de l'étude des implications de ce scénario, mais l'hypothèse de la masse négative semble offrir des réponses

intéressantes à des questions encore ouvertes dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, comme celle de la matière noire.

Celle-ci n'est pas tout : elle représente près de 25% du contenu de l'Univers, et s'y ajoutent 5% de matière ordinaire et environ 70% d'énergie noire (responsable de l'expansion accélérée de l'Univers). La nature de cette dernière reste à éclaircir et il en est de même de l'inflation, une phase d'expansion exponentielle subie par l'Univers dans ses premiers instants, que le modèle standard doit inclure pour expliquer certaines caractéristiques de l'Univers comme son homogénéité à grande échelle.

L'un des problèmes du modèle initial du Big Bang, jusqu'à la fin des années 1970, était que certaines régions distantes n'étaient pas causalement connectées, c'est-à-dire qu'elles n'avaient pas eu le temps d'interagir depuis la naissance de l'Univers. Or d'après les observations, ces régions ont presque exactement la même température, ce qui est difficile à expliquer si elles n'ont pas été en contact. L'inflation primordiale constitue une solution à ce problème. Elle assure que toutes les régions observées ont été causalement en contact. Mais aucune théorie fondamentale précise ne permet de comprendre comment on peut entrer dans cette dynamique inflationnaire, ni surtout comment en sortir.

NI MATIÈRE NOIRE, NI ÉNERGIE NOIRE, NI INFLATION

Il serait donc intéressant de voir si d'autres modèles cosmologiques sont capables de satisfaire les contraintes observationnelles actuelles en faisant l'économie d'hypothèses telles que la matière noire, l'énergie noire et l'inflation. Par exemple, en 2016, Subir Sarkar, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont analysé vingt ans de données obtenues à partir des supernovæ sur

les supernovæ de type Ia sont les « chandelles standard » : il est possible de déterminer leur distance et de mesurer la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous. Ce qui permet d'étudier la dynamique d'expansion de l'Univers au cours du temps. En comparant les données sur les supernovæ et des courbes de modèles théoriques, il est difficile aujourd'hui de distinguer le scénario standard du modèle de Milne.

la dynamique d'expansion de l'Univers. Ils ont remarqué qu'elles ne permettent toujours pas de distinguer de façon indiscutable le scénario d'expansion du cosmos tel qu'il est décrit par le modèle standard et un autre, l'univers gravitationnellement vide proposé dans les années 1930 par le Britannique Edward Arthur Milne (voir la figure ci-dessous). Distinguer les deux modèles de façon probante avec les supernovæ nécessiterait l'observer des explosions de ce type bien plus nombreuses, ce qui sera possible avec le futur télescope spatial *James-Webb* censé être lancé en 2022, ou les grands programmes de relevés galactiques comme *LSS* qui démarrera en 2023.

Le modèle de Milne est une solution cosmologique des équations de la relativité générale pour un univers où la densité d'énergie est nulle. Cet univers apparaît alors gravitationnellement vide. Sa dynamique ne présente ni accélération de l'expansion cosmique ni décélération. Un tel univers reste dans une phase d'expansion que l'on pourrait caractériser d'inflation minimale. Ce comportement constant et simple est à comparer au modèle standard, qui suppose une phase d'inflation initiale suivie d'une phase d'expansion d'abord décélérée, puis accélérée.

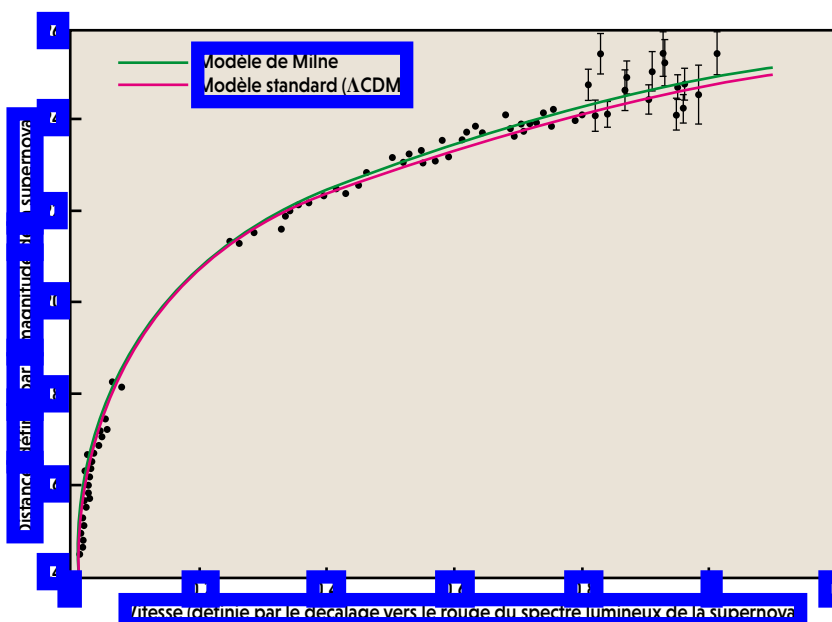
La dynamique particulière du modèle de l'univers de Milne implique que toutes les régions observables du cosmos sont causalement connectées. L'Univers est alors naturellement uniforme à grande échelle, sans avoir besoin de faire appel au mécanisme d'une brève phase d'inflation initiale.

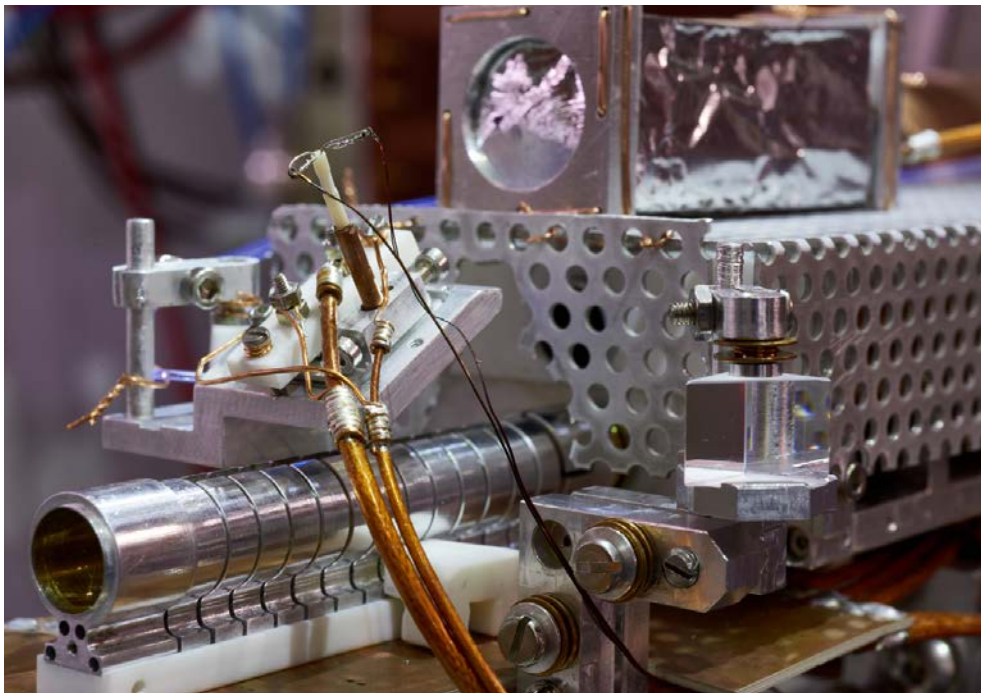
L'idée est intéressante. Cependant, la condition d'un univers de Milne gravitationnellement vide semble incompatible avec le fait que l'Univers où nous vivons contient de la matière. Mais elle serait satisfaite à grande échelle si le cosmos contient autant de matière de masse positive que d'antimatière de masse négative. C'est ce que nous avons nommé, avec Aurélien Benoît-Lévy, le modèle d'univers de Dirac-Milne. Il serait alors possible de se passer de l'énergie noire et de l'inflation... ainsi que de la matière noire, grâce à la polarisation du vide dans un champ gravitationnel.

DIRAC-MILNE À L'ÉPREUVE DES OBSERVATIONS

Il faut cependant souligner qu'une des forces du modèle standard est qu'il est en accord avec de nombreuses observations. Qu'en est-il du modèle de Dirac-Milne ?

Premier pilier observationnel du modèle standard : la nucléosynthèse primordiale. Elle décrit, en accord raisonnable avec les observations, la production des éléments légers (hydrogène, hélium, deutérium, lithium) dans les premières minutes de l'Univers après le Big Bang. Ces éléments ont été produits en moins de vingt minutes, puis l'Univers est devenu trop froid et





L'expérience AEGIS, au Cern, est conçue pour mesurer l'influence du champ gravitationnel sur des atomes d'antihydrogène. Le tube à gauche est un piège magnétique pour des antiprotons qui sont ensuite associés à des positrons arrivant par le haut. Les physiciens produisent alors un faisceau horizontal d'atomes d'antihydrogène qui traverse un détecteur (un déflectomètre à moiré), qui mesurera la déviation du faisceau sous l'influence du champ gravitationnel. La précision de l'expérience sera de l'ordre de 1 %.

filé pour que les réactions se poursuivent. Dans l'univers de Dirac-Milne, la température a baissé plus lentement. La durée de la nucléosynthèse a donc été beaucoup plus longue: plus de 30 ans! Pourtant, en dépit de cette différence énorme – un facteur de cinq millions –, l'univers de Dirac-Milne produit l'hélium 4, le lithium et le béryllium avec un aussi bon accord observationnel que le modèle standard.

Le seul élément où les prédictions diffèrent notablement est l'hélium 3, avec un excès d'un facteur 5 à 10 dans le modèle de Dirac-Milne. Cependant, cela ne permet pas de conclure lequel des deux modèles décrit le mieux la nucléosynthèse primordiale. En effet, l'hélium 3 est fragile. Il est produit et détruit au sein des étoiles ou dans leur voisinage pendant toute l'histoire de l'Univers, d'où la difficulté d'en déterminer la production primordiale à partir des mesures observationnelles.

Un autre pilier du modèle standard est la formation des grandes structures (galaxies, amas de galaxies et autres superstructures). En 2018, avec Giovanni Manfredi, de l'université de Strasbourg, et ses collègues, j'ai étudié la formation des grandes structures dans le contexte de l'univers de Dirac-Milne. Nous voulions voir si les simulations numériques reproduisaient correctement la distribution statistique observée. Nous avons développé une simulation prenant en compte notamment des effets non linéaires, qui apparaissent dans les régions où la densité devient forte par rapport à la densité moyenne.

Ces simulations constituent un test important, car l'univers de Dirac-Milne ne comporte aucun paramètre libre. La formation des

structures y démarre beaucoup plus tôt que dans le modèle cosmologique standard: les premiers objets massifs se constituent quelques dizaines de millions d'années seulement après le Big Bang. La structuration se poursuit par effondrements successifs, en partant de nuages de gaz qui ont typiquement une masse de quelques masses solaires. Résultat: notre simulation est en bon accord avec les observations des grands relevés récents comme SDSS (*Sloane Digital Sky Survey*).

LE DEFI DU FOND DIFFUS

L'un des grands succès de la cosmologie de ces dernières décennies est l'observation du fond diffus cosmologique. Ce rayonnement a été émis environ 380 000 ans après le Big Bang. À cette époque, la température est devenue assez faible pour que les particules électriquement chargées (électrons et noyaux atomiques) du plasma cosmique se combinent pour former des atomes neutres. La lumière, qui était jusque-là piégée dans le plasma par des interactions multiples, a commencé à se propager librement. La prédiction de la température observée aujourd'hui pour les vestiges de ce rayonnement a été l'un des arguments qui ont permis au modèle standard de s'imposer.

Une autre prédiction concernant le fond diffus cosmologique était l'existence de fluctuations de l'ordre de 10^{-5} kelvin dans ce rayonnement. Cela a été confirmé en 1992 par le satellite *Cobe*, puis par les satellites WMAP et Planck. La mesure toujours plus précise de ces fluctuations a permis d'établir leur distribution spatiale et statistique (nommée spectre d'anisotropies du fond diffus cosmologique). Cette

analyse est une mine d'informations sur les conditions de l'Univers primordial, mais aussi sur celles qui ont prévalu tout au long de la propagation du rayonnement à travers le cosmos. Un modèle cosmologique se doit de reproduire correctement ce spectre, un test souvent fatal pour les modèles cosmologiques concurrents du modèle standard.

Dans le cas du modèle de Dirac-Milne, l'annihilation matière-antimatière dans le plasma primordial a provoqué des ondes acoustiques dont l'échelle spatiale est d'environ un degré, ce qui est justement l'échelle angulaire du pic principal du spectre d'anisotropies du fond diffus cosmologique. Cependant, nous sommes encore loin de pouvoir justifier la hauteur relative des pics suivants dans ce modèle. C'est probablement l'un des défis les plus importants du modèle de Dirac-Milne. Si nous parvenons à reproduire ces pics, il est certain que la communauté des cosmologistes s'intéressera de près à ce modèle.

Le chemin est encore long pour passer tous les tests cosmologiques, mais le modèle de Dirac-Milne offre déjà des pistes de réflexion intéressantes et encourageantes. Il est séduisant d'avoir un modèle qui permettrait de se dispenser de matière noire, d'énergie noire et de l'inflation, trois hypothèses essentielles au modèle standard, mais qui posent de nouvelles questions sans réponse. Un autre intérêt du modèle de Dirac-Milne est de pouvoir être testé dans des expériences de physique des particules.

UN MODÈLE EN TEST AU CERN

En particulier, la mesure d'un comportement anormal des antiparticules dans le champ gravitationnel de la Terre serait un indice fort. Dès la fin des années 1960, Fred Witteborn et William Fairbank, de l'université Stanford, se sont intéressés à la mesure de la masse gravitationnelle de l'électron, dans le but de réaliser ensuite la même mesure pour le positron, son antiparticule. Mais du fait de la très faible masse de l'électron, leur mesure était très perturbée par le bruit électromagnétique ambiant, occultant l'effet de la gravitation.

Après cette première tentative, Michael Holzschneider et ses collègues, au Cern, ont conçu l'expérience PS-200 pour réaliser une mesure similaire sur des antiprotons, bien plus lourds que les positrons. Mais malgré cela, à partir du milieu des années 1990, il était devenu clair que le bruit électromagnétique rendait très difficiles, pour ne pas dire impossibles, les expériences de mesure d'effets gravitationnels sur des particules chargées. C'est donc sur des atomes d'antihydrogène (électriquement neutre) que les expériences AEGIS, Gbar et ALPHA-g tentent aujourd'hui au Cern de mesurer l'effet du champ gravitationnel sur l'antimatière.

Ces expériences sont installées auprès d'un nouvel anneau de décélération du Cern, *Elena* (pour *Extremely low energy antiproton ring*, anneau d'antiprotons à extrêmement basse énergie) où des antiprotons (d'abord produits lors de collisions à haute énergie) sont ralentis pour atteindre des énergies de seulement 0,1 mégaélectronvolt. Il est alors possible de

Dans l'expérience Gbar, les antiprotons sont refroidis à quelques dizaines de microkelvins

les combiner avec des positrons (produits par un accélérateur linéaire qui bombarde d'électrons un bloc de tungstène) pour produire des atomes d'antihydrogène.

Notons que tout au long de leur vie, les antiprotons produits doivent être isolés de tout contact avec la matière grâce à des pièges électromagnétiques, faute de quoi ils s'annihilent presque aussitôt. Dans l'expérience Gbar, les antiprotons sont d'abord dotés de deux positrons. Ainsi chargés, ces ions restent faciles à manipuler et à piéger dans un champ électromagnétique. Ils sont alors refroidis à une température de quelques dizaines de microkelvins, ce qui correspond à une vitesse de l'ordre de un mètre par seconde. Ensuite, grâce à un laser, on leur arrache un des deux positrons, ce qui fournit des atomes d'antihydrogène, électriquement neutres et soumis à la seule force de pesanteur. Lors d'une chute libre d'environ 20 centimètres, les chercheurs étudieront leur mouvement pour voir s'il diffère de celui des atomes de matière. Les trois expériences présentent les stratégies de mesures différentes (voir la figure page 42), ce qui permettra de comparer leurs résultats et de voir s'ils sont cohérents.

Depuis novembre 2018, les installations du Cern ont été fermées pour une période de 2,5 ans pour mettre à jour le LHC et y augmenter la fréquence des collisions et pour améliorer toutes les expériences. Il n'y aura donc pas de production d'antiprotons au cours de cette période. Mais dès 2021, les équipes de AEGIS, Gbar et ALPHA-g seront prêtes pour voir si oui ou non les atomes d'antimatière « tombent vers le haut ».

BIBLIOGRAPHIE

S. Chardin, **L'insoutenable gravité de l'univers**, Le Pommier. 2018.

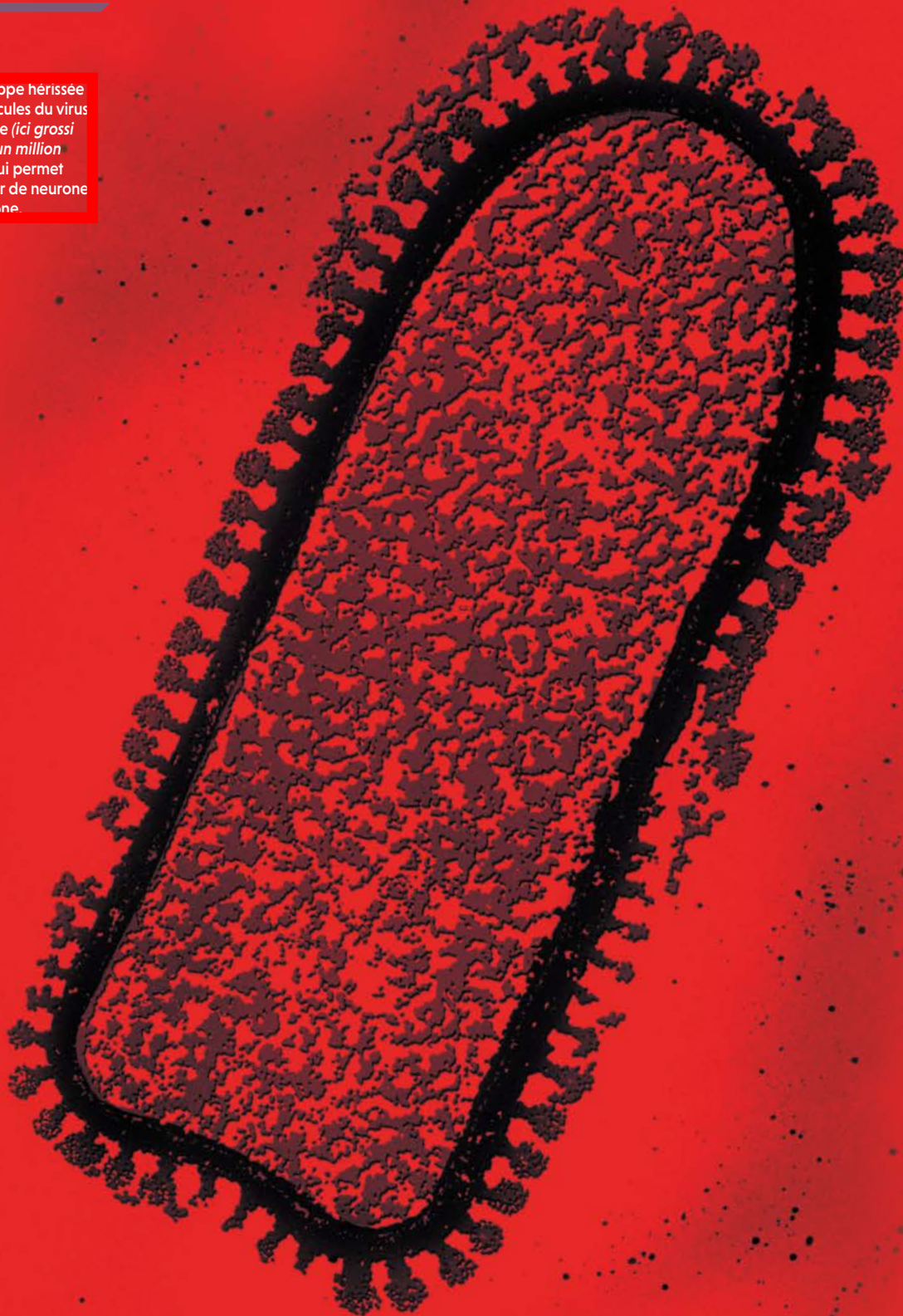
S. Maniředi et al., **Cosmological structure formation with negative mass**, *Phys. Rev. D.*, vol. 98, 023514. 2018.

P. Indelicato et al., **The GBAR project, or how does antimatter fall ?**, *Hyperfine Interactions*, vol. 228, n° 1-3, pp. 141-150. 2014.

A. Benoit-Levy et G. Chardin, **Introducing the Dirac-Milne universe**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 537, A78. 2012.

K. H. Price, **Negative mass can be positively amusing**, *Am. J. Phys.*, vol. 61(3), pp. 216-217. 1993.

l'enveloppe hérissée de molécules du virus de la rage (*ici grossies environ un million de fois*) lui permet de passer de neurone en neurone.



L'ESSENTIEL

• Le virus de la rage est mortel pour l'hôte qu'il contamine, car il remonte les chaînes de neurones de proche en proche afin d'atteindre le cerveau.

• Les neuroscientifiques exploitent cette fonction : ce virus modifié lors de diverses manipulations génétiques permet aux chercheurs

de suivre son parcours. D'où une cartographie des réseaux neuronaux chez les animaux en laboratoire.

• Des reconfigurations encore plus complexes du virus permettent même aux scientifiques de « contrôler » les circuits cérébraux pour en comprendre les fonctions

L'AUTEUR



ANDREW J. MURRAY
Chercheur en neurosciences
au Sainsbury Wellcome Centre
for Neural Circuits and
Behaviour, à Londres

RAGE

un virus pour explorer le cerveau

Comment cartographier les circuits neuronaux et identifier leur fonction avec une précision inégalée ? En utilisant le virus de la rage

An clair de lune, sur la lande anglaise, trois personnages de fiction sont les témoins d'une vision d'horreur : « Une horrible bête, noire, de grande taille, ressemblant à un chien, mais à un chien ayant des proportions jusqu'alors inconnues. La bête tenait ses crocs enfoncés dans la gorge de Hugo Baskerville. Au moment où les trois hommes s'approchaient, elle arracha un lambeau de chair du cou de Baskerville et tourna vers eux ses prunelles de feu et sa gueule rouge de sang... Le trio, secoué par la peur, s'enfuit en criant. » Sur les traces de Holmes et Watson, les historiens de la médecine ont suivi la terreur qu'Arthur Conan Doyle a suscitée chez les lecteurs de son *Chien des Baskerville* jusqu'à l'impact profond que la rage a laissée dans la conscience collective britannique contemporaine.

Capable de transformer le plus calme des petits chiens en une bête cruelle, mortel dans près de 100% des cas, le virus de la rage est considéré comme l'un des fléaux les plus redoutés de l'histoire. En 1804 déjà, les travaux du médecin allemand Georg Gottfried Zinke ont révélé que la pathologie se transmet par la salive des animaux infectés. Le germe

infectieux augmente par ailleurs la quantité de salive produite dans la cavité buccale, d'où l'excès de bave constaté chez les chiens enrages. Puis, dans les années 1880, Louis Pasteur a montré que le virus infecte le cerveau. Aucun de ces événements n'est dû au hasard. De fait, deux siècles de recherches ont à présent établi non seulement que le virus de la rage est transmis par la bave d'un animal infecté, mais qu'il exacerbe le comportement agressif de cet animal et son envie de mordre : grâce à une prouesse de l'évolution, le virus assure sa transmission en manipulant le cerveau de ses victimes, et donc leurs comportements.

Aujourd'hui, la rage tue plus de 59 000 personnes par an dans le monde. Mais grâce aux campagnes de vaccination et aux mises en quarantaine des animaux infectés, cette maladie n'est plus synonyme de terreur, du moins dans les pays développés. Des neuroscientifiques essaient même de tirer profit du germe malin, en concentrant leurs recherches sur la faculté du virus à sauter de neurone en neurone, depuis le site de morsure jusqu'au cerveau, sans être inquiété par le système de défense immunitaire. Ainsi, plusieurs équipes de scientifiques, dont la mienne, utilisent la rage pour visualiser les connexions entre neurones.

Notre cerveau contient des milliards de cellules, chacune étant connectée à des milliers d'autres. La cartographie de ces réseaux, la nature des informations reçues par un type particulier de neurone et la façon dont les signaux électriques sont échangés entre neurones nous permettent par exemple de mieux comprendre les phénomènes biologiques à l'origine de nos émotions et de nos comportements, voire de mieux prendre en charge certains troubles neurologiques comme la maladie de Parkinson. Comment le virus de la rage nous aide-t-il en cela ?

La morsure d'un animal enragé permet aux particules virales, ou virions, de traverser la peau et d'atteindre les tissus musculaires situés en dessous. Petite «capside», ou capsule, contenant un simple brin d'ARN (l'information génétique) et des protéines, le virion de la rage est recouvert de molécules pointues particulières : les glycoprotéines. C'est cette enveloppe de glycoprotéines qui lui permet précisément de pénétrer les neurones moteurs présents sur le site de la morsure ; ces neurones commandent la contraction des muscles et sont les derniers maillons d'une longue chaîne d'autres neurones qui conduit au cerveau, la destination finale du virus.

LE VIRUS « DUPE » LES NEURONES

Plus précisément, les glycoprotéines se lient à un récepteur de la terminaison synaptique d'un neurone, l'endroit où ce dernier transmet une information à un neurone voisin. Comme les portes permettant de sortir de la zone sécurisée d'un aéroport – mais pas d'y entrer –, la terminaison synaptique contrôle une zone d'échange à sens unique – la synapse – entre deux neurones. Ainsi, la direction du flux entrant dans la synapse suit celle du signal électrique qui circule d'un neurone à l'autre, tout le long de la chaîne neuronale allant du cerveau aux muscles. Et c'est là la première particularité du virus de la rage : il se déplace à contre-courant jusqu'à atteindre le cerveau. Pour ce faire, un seul moyen possible : le virus «dupe» le récepteur auquel il se lie pour entrer dans le neurone par la synapse en empruntant la porte de sortie.

Les virus sont connus pour détourner les fonctions des cellules hôtes pour leurs propres intérêts, mais peu excellent aussi bien que le virus de la rage. Une fois à l'intérieur du neurone, l'intrus se débarrasse de ses glycoprotéines et libère son ARN qui se met alors au travail : il utilise le matériel et l'énergie de l'hôte pour se «répliquer», c'est-à-dire produire des copies de lui-même, mais également des autres protéines du virus. Toutes ces copies fraîchement synthétisées s'assemblent ensuite et forment de nouveaux virions. Si la plupart des espèces de virus se répliquent tellement vite qu'elles forcent la cellule hôte à éclater, ce qui libère les nouvelles particules virales, l'agent de la rage, lui, prend

tout son temps et limite sa reproduction, ne créant que la juste dose de virions qui passeront dans d'autres neurones et poursuivront leur chemin.

Ainsi, le virus de la rage ne produit pas de dégâts cellulaires suffisants pour alerter le système immunitaire. Il laisse derrière lui une cellule hôte intacte et traverse la synapse, à contre-courant certes, mais *incognito*, à la conquête d'un nouveau neurone. Cette discrétion explique en partie la longue période d'incubation asymptomatique qui précède le déclenchement de la maladie, en général de un à trois mois chez les humains.

Ayant atteint un nouveau neurone, le virion répète sa chorégraphie : libération des glycoprotéines, réplication, assemblage de nouveaux virions, déplacement à contresens jusqu'au neurone «précédent». Ainsi, de cellules en cellules, le virus remonte le système nerveux, du premier neurone moteur rencontré dans le muscle jusqu'à la moelle épinière, puis jusqu'au cerveau (*voir l'encadré rage ci-contre*).

Au début des années 2000, plusieurs équipes, dont celles de Gabriella Ugolini, de l'institut des neurosciences de Paris-Saclay, et de Peter Strick, de l'université de Pittsburgh, ont utilisé le virus de la rage pour suivre son trajet puis analyser les circuits neuronaux. C'était un défi de taille. Comment distinguer le premier saut du virus d'un neurone à l'autre du deuxième, et ainsi de suite, à partir d'images de neurones infectés ? Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont d'abord inoculé le virus à des animaux de laboratoire, puis les ont euthanasiés rapidement, afin que le virus n'ait eu le temps de traverser qu'une ou deux synapses. Cela leur a permis d'identifier les circuits cérébraux majeurs contribuant au contrôle moteur. Mais la technique avait ses limites. Les connexions entre neurones diffèrent : une synapse peut être «forte» ou «faible» et, selon, engendrer un signal qui aura plus ou moins d'impact sur

**Le virus se déplace
incognito de neurone
en neurone,
sans les détruire**

UTILISER LA RAGE POUR CARTOGRAPHIER LES CIRCUITS DE NEURONES

Le virus de la rage se fraye un chemin du site de la morsure jusqu'au cerveau en voyageant d'un neurone à l'autre.

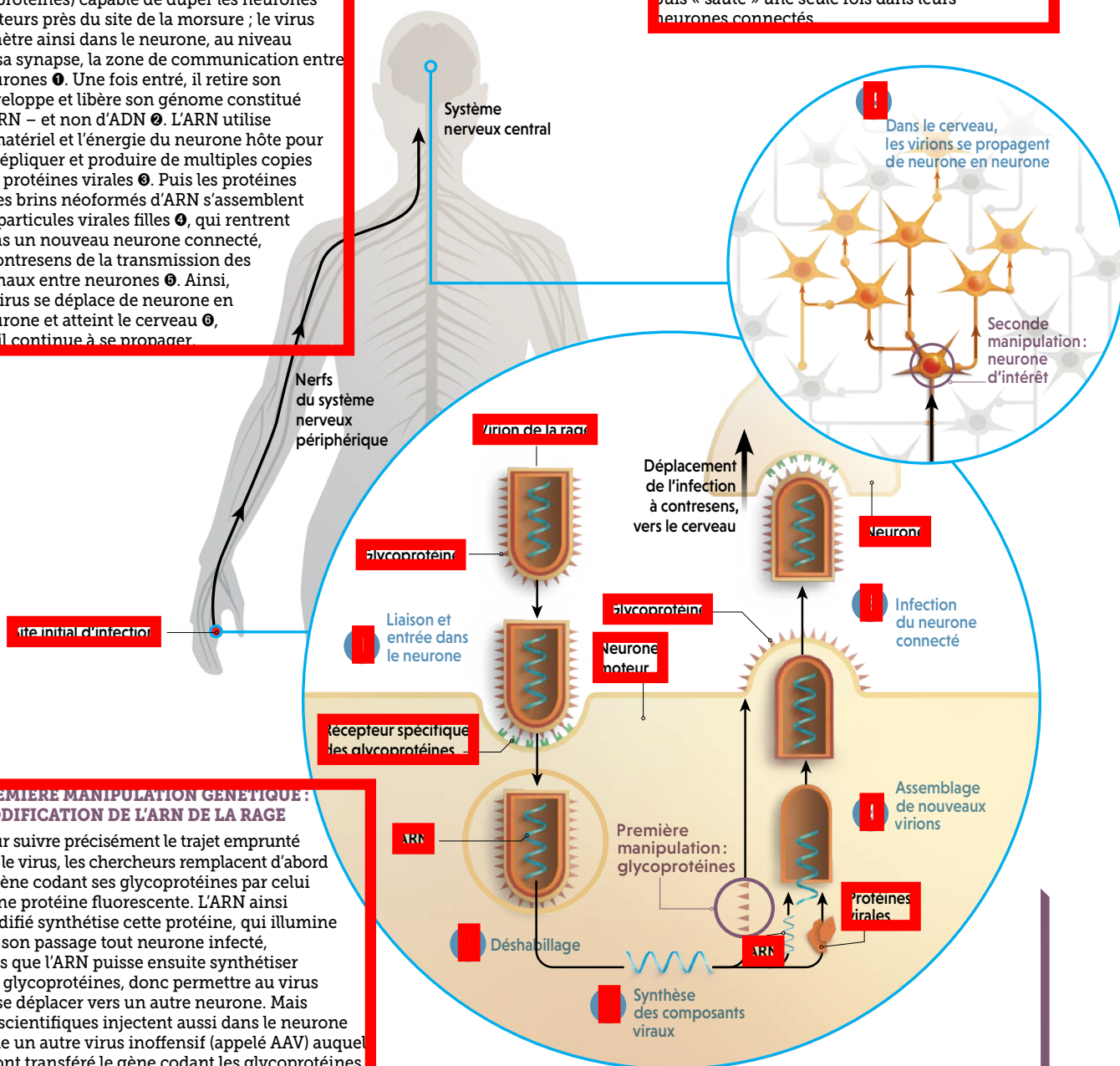
Les chercheurs exploitent cette aptitude pour analyser les connexions entre neurones dans les circuits cérébraux complexes. Différentes manipulations génétiques ont permis de rendre le virus fluorescent, afin de voir les neurones qu'il infecte, puis de l'obliger à ne sauter qu'une seule fois vers un autre neurone, afin d'identifier les connexions.

LE VIRUS DE LA RAGE NON MANIPULÉ

Le virion de la rage, ou particule virale, possède une enveloppe de glycoprotéines (une famille de protéines) capable de duper les neurones moteurs près du site de la morsure ; le virus pénètre ainsi dans le neurone, au niveau de sa synapse, la zone de communication entre neurones ❶. Une fois entré, il retire son enveloppe et libère son génome constitué d'ARN – et non d'ADN ❷. L'ARN utilise le matériel et l'énergie du neurone hôte pour se répliquer et produire de multiples copies des protéines virales ❸. Puis les protéines et les brins néoformés d'ARN s'assemblent en particules virales filles ❹, qui rentrent dans un nouveau neurone connecté, à contresens de la transmission des signaux entre neurones ❺. Ainsi, le virus se déplace de neurone en neurone et atteint le cerveau ❻, où il continue à se propager.

SECONDE MANIPULATION GÉNÉTIQUE : ALTÉRATION DE L'ENVELOPPE VIRALE

Pour restreindre l'infection virale aux régions cérébrales d'intérêt, les chercheurs exploitent la variabilité des glycoprotéines dans la nature. En effet, les glycoprotéines portées par les virus qui infectent les oiseaux, par exemple, sont en général incapables de pénétrer dans une cellule de mammifères. Donc en remplaçant les protéines de l'enveloppe du virus de la rage par celles des virus aviaires, les chercheurs empêchent le virus de la rage modifié d'infecter les neurones de souris. Ensuite, ils équipent les neurones cibles du cerveau des souris de récepteurs spécifiques de ces glycoprotéines aviaires : ainsi, le virus de la rage modifié injecté directement dans le cerveau ne rentre que dans les neurones cibles, puis « saute » une seule fois dans leurs neurones connectés.



l'allumage» ou l'excitation du neurone suivant. Une synapse peut aussi se situer près du corps cellulaire du neurone (où se trouve le noyau) ou, au contraire, à l'extrémité des prolongements neuronaux. Et certains neurones n'ont qu'une seule connexion avec le neurone suivant, tandis que d'autres projettent des centaines de connexions. Cette hétérogénéité implique que le virus met plus ou moins de temps pour voyager d'un neurone à l'autre, ce qui complique encore l'analyse de son trajet.

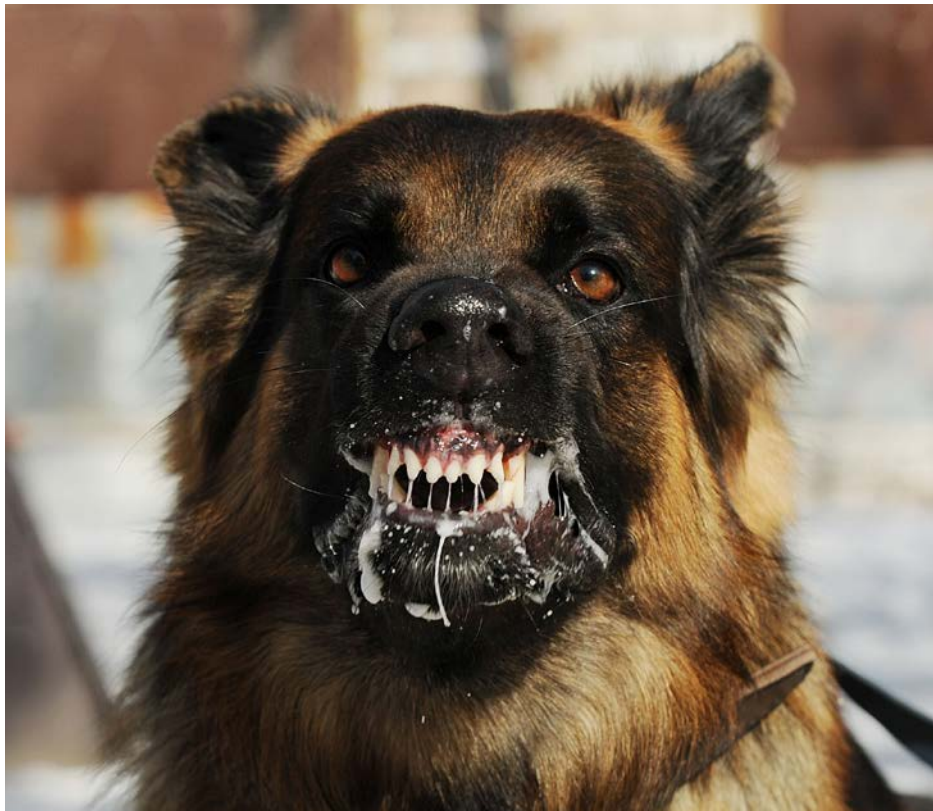
Pour contourner cette difficulté, les scientifiques ont reconfiguré le virus de la rage. Les biologistes moléculaires savent depuis longtemps manipuler l'ADN : modifier le génome se fait désormais en routine dans les laboratoires. Certes, le virus de la rage n'est pas fait d'ADN, mais d'ARN. Peu importe : l'avènement de la génétique inverse, une technique qui a offert la possibilité de modifier des molécules d'ARN en manipulant leurs copies d'ADN complémentaire, a permis de franchir cet obstacle. En 1994 déjà, Matthias Schnell et Karl-Klaus Conzelmann, au Centre fédéral de recherche pour les maladies virales des animaux, à Tübingen, en Allemagne, ont réussi à fabriquer des virus fonctionnels à partir d'ADN et à en modifier le génome, c'est-à-dire le brin d'ARN qui code leurs fonctions particulières.

Cette technique de manipulation du génome a permis de mieux comprendre comment les différents gènes du virus contribuent à ses aptitudes. Ainsi, un seul gène est responsable du déplacement entre neurones, et c'est justement celui qui code les glycoprotéines. Retirez ce gène et le virus est encore capable d'infecter une cellule hôte, mais il y reste prisonnier. Cette découverte a fait entrer le virus de la rage dans le champ des neurosciences.

RECONFIGURER LE VIRUS POUR SUIVRE SON TRAJET

Ainsi, en 2007, les neuroscientifiques Ian Wickersham et Edward Callaway, alors à l'institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie, conjointement avec Karl-Klaus Conzelmann et Stefan Finke, virologue de l'institut Friedrich-Loeffler, en Allemagne, ont mis au point une technique de cartographie des réseaux de neurones innovante. Première étape : remplacer le gène des glycoprotéines par celui d'un marqueur fluorescent. Le virus ainsi génétiquement modifié ne synthétise plus de glycoprotéines, mais des copies d'ARN de la protéine fluorescente (et de ses autres protéines virales). De sorte que les cellules infectées brillent de la couleur choisie par les chercheurs.

Deuxième étape : fournir au virus « fluorescent » les glycoprotéines manquantes par une autre voie biologique, afin que les nouvelles particules synthétisées dans les cellules hôtes puissent se vêtir de leur indispensable



UN VIRUS MANIPULÉ

Le virus de la rage est capable d'augmenter la quantité de salive produite, ou il est présent en grande quantité, et modifie le comportement de son hôte : l'animal alors « enrage » en mordant une cible, permet la transmission du virus.

enveloppe et sauter vers un autre neurone, mais une seule fois – pas plus. Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé un autre type de virus, très simple, appelé virus adénoassocié (AAV), car on le trouve souvent associé à des virus plus gros nommés adénovirus. Les AAV contiennent non pas de l'ARN, mais une petite molécule d'ADN. Les chercheurs ont inséré dans son ADN le gène codant les glycoprotéines du virus de la rage. Ainsi, dans la cellule hôte qui a reçu les deux virus, le virus de la rage fluorescent redevient capable de traverser une synapse grâce aux glycoprotéines synthétisées par l'AAV. En revanche, il est incapable d'intégrer le gène des glycoprotéines dans son propre génome, car il est constitué d'ADN et non d'ARN. De sorte qu'une fois la synapse franchie, le virus de la rage est à nouveau bloqué. Les images révèlent ainsi les populations de cellules infectées une seule fois, et donc connectées au neurone cible.

Toutefois, une autre difficulté persistait : l'administration du virus de la rage directement dans le cerveau des animaux de laboratoire infectait tous les neurones dont les prolongements étaient en contact avec le site d'injection. Sans la possibilité de contenir cette infection initiale à un nombre restreint de neurones, les



Chercheurs étaient incapables de différencier les neurones contaminés par l'injection de ceux infectés après que le virus a sauté à travers une synapse. La solution est venue d'un autre champ de recherche en virologie: l'étude des virus spécifiques des oiseaux.

AVEC L'AIDE DES AGENTS INFECTIEUX DES OISEAUX

En effet, dans la nature, on a découvert des familles entières de virus qui n'infectent que certains groupes d'animaux. Par exemple, le virus de la leucose du sarcome aviaire (ASLV) provoque souvent des cancers chez les poulets, mais est en général incapable d'infecter les cellules de mammifères. Comme le virus de la rage, cet ASLV est recouvert d'une enveloppe de glycoprotéines. Toutefois, ces molécules ont différentes configurations, et chaque sous-type se lie à un récepteur spécifique. Par exemple, la glycoprotéine EnvA («Env» pour enveloppe et «A» pour caractériser le sous-type) se fixe uniquement au récepteur TVA (pour *avian tumor receptor virus A*). De sorte que si une cellule ne porte pas à sa surface de récepteur TVA, elle ne peut pas être infectée par un virus à glycoprotéines EnvA.

Cette sélectivité a permis aux chercheurs de restreindre l'infection initiale par le virus de la rage à un type de neurones. Comment? Grâce à une technique nommée pseudotypage: en injectant le gène de la glycoprotéine EnvA dans des cellules en culture infectées par le virus de la rage fluorescent (qui ne produisait donc plus ses glycoprotéines), Ian Wickersham, Edward Callaway et leurs collègues ont produit des virions de la rage dont l'enveloppe portait les glycoprotéines EnvA issues du virus aviaire (et toujours aucune de leurs glycoprotéines d'origine). Le virus de la rage était ainsi incapable de pénétrer des cellules de mammifères. Sauf si l'on dotait le neurone cible, logé dans le cerveau d'une souris, d'un récepteur TVA. C'est

ce qu'ont fait les chercheurs, s'assurant ainsi que le virus de la rage n'infecterait que ce neurone, et pas un autre.

Puis le neurone portant le récepteur TVA (en réalité, il s'agit d'un petit groupe de neurones identiques) a aussi reçu un virus AAV contenant le gène des glycoprotéines du virus de la rage. Une fois à l'intérieur de la cellule cible, le virus de la rage a perdu son déguisement de poulet – son enveloppe de EnvA –, récupéré des glycoprotéines normales apportées par l'AAV et sauté au neurone suivant. En contraignant les virus de la rage à infecter un seul groupe de neurones de départ bien défini, les chercheurs ont ainsi obtenu une image précise des connexions cérébrales.

Cette technique, simple et élégante, que ses inventeurs ont nommée ΔG en référence aux glycoprotéines altérées, a vite conquis la communauté des neuroscientifiques. Grâce à elle, les chercheurs ont observé quels neurones communiquent entre eux. Mais, comme toutes les innovations, la méthode a ses limites: parfois, le nombre de connexions «allumées» n'est pas significatif – en moyenne, dix pour un neurone de départ infecté.

En 2015, quand Thomas Reardon, Thomas Jessell, Attila Losonczy et moi-même travaillions à l'université Columbia, à New York, nous avons utilisé cette technique pour explorer les circuits neuronaux responsables des commandes motrices, qui contrôlent nos muscles. Or, devant le faible nombre de connexions observées dans la moelle épinière ou dans le cerveau, nous avons suspecté que nous avions vu une image très incomplète des circuits moteurs. Mais pourquoi? Nous avons découvert un phénomène de neurotoxicité: une fois le virus dans la cellule, celle-ci commençait à perdre de sa vitalité et mourait dans les deux semaines. Le virus perturbait le fonctionnement des neurones, de sorte qu'il nous était compliqué d'interpréter correctement nos résultats.

Nous avons donc demandé de l'aide à Matthias Schnell et Christoph Wirblich, de l'université Thomas-Jefferson, à Philadelphie, spécialistes de la biologie du virus de la rage. Ils ont immédiatement compris l'origine du problème: nous utilisions la mauvaise souche du virus. Elle avait été développée pour la fabrication de vaccins antirabiques. Or ces derniers incorporent des souches spéciales de particules virales sélectionnées pour leur capacité à se reproduire anormalement vite: les nouveaux virions détruisent ainsi les cellules cibles et sont libérés, si bien qu'ils alertent le système immunitaire très tôt, quand il n'est pas encore trop tard. Et comme nous travaillions avec des souris, nos nouveaux collègues ont suggéré que nous devions utiliser une autre souche virale, laissée depuis de nombreuses années, mais qui infectait les neurones de rongeurs.

Un seul gène est responsable du déplacement du virus entre les neurones

Le virus à l'origine de cette souche avait été isolé dans la nature puis «fixé» en laboratoire, c'est-à-dire introduit plusieurs fois dans le cerveau de souris ou dans des lignées de cellules murines, afin qu'il évolue et se spécialise pour le système nerveux de souris. Ainsi, avec cette nouvelle souche et la technique ΔG de traçage neuronal, nous avons visualisé un nombre beaucoup plus important de connexions que celles observées précédemment pour les circuits du contrôle moteur; les protéines virales n'ont pas alerté le système immunitaire des souris et leurs neurones sont restés suffisamment fonctionnels.

Nous sommes alors passés à l'étape suivante: nous avons modifié la technique ΔG en remplaçant, dans les virus de la rage, le gène de la protéine fluorescente par celui d'une protéine photosensible, la canal-rhodopsine, découverte initialement dans une variété d'algue verte. Quand de la lumière bleue active cette protéine, un canal situé en son centre s'ouvre et permet l'entrée d'ions chargés positivement dans le neurone cible, lequel émet alors un signal électrique (ce neurone continuait néanmoins à briller, car nous avons en fait utilisé une version de la canal-rhodopsine qui contenait aussi une protéine fluorescente). Résultat: nous avons observé l'excitation de circuits neuronaux pendant que les souris effectuaient certaines tâches, et nous avons pu «allumer» et «éteindre» ces circuits à notre convenance (en stimulant la canal-rhodopsine avec un laser bleu), jusqu'à un mois après l'infection. De quoi envisager, pour l'avenir, des tests permettant d'identifier les groupes de neurones responsables de certains comportements.

LA RAGE EXPLIQUE COMMENT FONCTIONNE NOTRE SYSTÈME VISUEL!

D'autres équipes de neuroscientifiques ont travaillé avec différentes versions du système ΔG et cartographié des réseaux de neurones pour comprendre comment ils contribuent aux perceptions et aux comportements des animaux. Prenons l'exemple du système visuel. Quand la lumière entre dans l'œil, les neurones logés derrière la rétine, appelés cellules ganglionnaires, transmettent des signaux au cerveau. Jusque-là, les scientifiques pensaient que l'information passait par différents relais cérébraux avant d'être traitée dans le cortex cérébral. L'équipe suisse de Botond Roska, de l'institut Friedrich-Miescher pour la recherche médicale, a utilisé le système ΔG de la rage pour traquer les signaux émis par les cellules ganglionnaires de la rétine vers le noyau géniculé latéral, une région du cerveau uniquement considérée comme un relais de l'information.

Quelle a été la surprise des chercheurs: ils ont en fait découvert trois types de neurones dans ce noyau, chacun traitant déjà l'information

La cartographie neuronale avec ce virus n'en est qu'à ses débuts

de façon distincte. Ainsi, moins d'un tiers des neurones sert effectivement de relais d'information jusqu'au cortex. Mais près d'un autre tiers reçoit des combinaisons de signaux provenant d'un seul œil, et les 40% restants, des signaux issus des deux yeux. Conclusion: si le noyau géniculé latéral intervient bien à un stade précoce du traitement de l'information visuelle, la plupart des neurones le constituant sont déjà capables d'intégrer des données de sources multiples. Des résultats qui ont précisé comment le cerveau traite l'information visuelle.

COMMENT TENONS-NOUS DEBOUT DANS LE MÉTRO?

Quant à nous, à l'université Columbia, nous nous sommes intéressés aux neurones du noyau vestibulaire latéral, la région du cerveau responsable du maintien de l'équilibre. Imaginez que vous êtes dans le métro, qui se met brutalement à freiner, sans raison apparente. Presque de façon instinctive, vous déplacez vos pieds pour compenser l'effet, tendez vos jambes et peut-être attrapez la barre centrale la plus proche. Comment le cerveau active-t-il si vite le bon groupe de muscles dans ce genre de situation?

Nous avons montré que le noyau vestibulaire latéral des souris contient deux groupes de neurones anatomiquement distincts, chacun ayant ses propres connexions avec le reste du système nerveux. Le premier groupe s'active instantanément quand le cerveau perçoit que le corps est instable; ces neurones permettent l'extension des membres pour augmenter la surface de support. Puis le second groupe renforce et stabilise les articulations des membres; cela permet au corps de retrouver sa position de départ. Nous avions en effet la possibilité d'activer ces neurones en envoyant simplement une lumière bleue dans le noyau vestibulaire latéral grâce à une fibre optique: quand la lumière s'allumait, les souris ajustaient la position de leurs membres, comme pour se retenir de tomber, alors même qu'elles n'étaient pas déséquilibrées.

L'équipe de Nao Uchida, à l'université Harvard, aux États-Unis, a enquêté sur un troisième point: la fonction des neurones qui libèrent de la dopamine, un neurotransmetteur.

EN CHIFFRES

59 000

meurtres par an dans le monde à cause du virus de la rage. On en compte bien moins qu'il y a un siècle, car les campagnes de vaccination et les mises en quarantaine d'animaux infectés limitent la propagation.

C'est-à-dire une molécule de communication entre neurones. Ces neurones dits dopaminergiques, issus de deux régions du cerveau, la substance noire compacte et l'aire tegmentale ventrale, sont connus pour intervenir dans le système cérébral du plaisir et de la récompense: ils s'allument par exemple dès qu'un animal reçoit une friandise ou quand un stimulus annonce son arrivée imminente (un peu comme cela se passe dans votre cerveau quand vous mangez un bonbon ou entendez le bruit du papier qui l'enveloppe).

TRAITER DES MALADIES CÉRÉBRALES ?

Pour déterminer la nature de l'information reçue par ces neurones et leur fonction, les chercheurs ont dû identifier les régions auxquelles ils sont connectés. Grâce au système ΔG de la rage, l'équipe de Harvard a découvert que les neurones dopaminergiques de la substance noire compacte perçoivent des informations sur la pertinence d'un stimulus: ce bruit de papier me promet-il une gourmandise? Quant aux neurones de l'aire tegmentale ventrale, ils reçoivent des données sur la qualité de la récompense: à quel point vais-je me faire plaisir en mangeant cette friandise?

Parfois, les neurones dopaminergiques de la substance noire compacte dégèrent. C'est le cas dans la maladie de Parkinson. Or Nao Uchida et ses collègues ont aussi découvert, avec surprise, que les signaux les plus forts reçus par les neurones de la substance noire compacte proviennent du noyau subthalamique, une région du cerveau impliquée dans le contrôle des mouvements. Le fait d'activer ce noyau en y implantant une électrode – une technique connue sous le nom de stimulation cérébrale profonde – permet souvent de diminuer les symptômes des patients parkinsoniens. Supposant que la connexion «forte» ainsi identifiée explique pourquoi la stimulation fonctionne souvent chez les patients, les neuroscientifiques en ont déduit qu'en stimulant d'autres régions du cerveau communiquant avec la substance noire compacte, on pourrait aider certains patients. Des études sont en cours pour déterminer lesquelles.

Les recherches mettant en œuvre le virus de la rage n'en sont qu'à leurs balbutiements. D'autres découvertes sur les circuits de neurones et leurs fonctions sont attendues, notamment pour mieux traiter certaines maladies neurologiques. Ce virus a tant manipulé les hommes pendant des milliers d'années qu'il a bien mérité d'être à son tour manipulé.

BIBLIOGRAPHIE

M. Watabe-Uchida et al., **Whole-brain mapping of direct inputs to midbrain dopamine neurons**, *Neuron*, vol. 74, pp. 858-873. 2012.

J. R. Wickersham et al., **Monosynaptic restriction of transsynaptic tracing from single, genetically targeted neurons**, *Neuron*, vol. 53, pp. 639-647. 2007.

Dans le cadre de l'exposition *Océan, une plongée insolite*

LES { Partagez les savoirs }
RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

TABLE-RONDE

Lundi 8 avril - 19h
L'océan, vecteur d'imaginaire ?
Animée par **Émilie Mariat-Roy**, anthropologue, Muséum
Avec **Guigone Camus**, ethnologue, Université de la Polynésie Française
Brigitte Gauvin, médiéviste, Université de Caen
Patrick Geistdoerfer, océanographe, membre de l'Académie de Marine

PROGRAMMATION AUDIOVISUELLE

Samedi 13 avril - 15h
La mer sensible
Échanges avec **Hélène Artaud**, anthropologue, Muséum
Hélène David, photographe
Hervé Glotin, bioacousticien, CNRS - Université de Toulon
Projection du film de **Sonia Levy**, *For the Love of Corals* (26 min), suivie d'une conversation entre l'artiste et **Sébastien Taninoz**, biologiste

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

COURS PUBLICS

L'homme et la mer
Avec **Frédérique Chlous**, professeure d'anthropologie sociale et directrice du département Homme et Environnement, Muséum.

Jeudi 4 avril - 18h
Les questions de l'anthropologie maritime

Jeudi 11 avril - 18h
Les milieux marins, les espaces appropriés ?

Jeudi 18 avril - 18h
Les marquisiens, peuple de l'océan

Grand Amphithéâtre du Muséum
17 rue Cuvier, Paris 5^e



L'ESSENTIEL

Le mot « Hexagone » sert souvent à désigner la France métropolitaine et continentale.

On peut se demander si la carte géographique de ce territoire est bien représentée par un hexagone régulier.

Comme critère de qualité de cette représentation, les auteurs ont choisi l'aire totale

des non-recouvrements, qui doit être minimale.

Leurs calculs ont montré que le polygone régulier qui représente le mieux la France métropolitaine n'est pas un hexagone, mais un carré.

LES AUTEURS

KAREL ZIMMERMANN, physicien, a été maître de conférences à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, et chercheur à l'Inra, unités MIG puis MaIAGE.

FRANÇOIS RODOLPHE, mathématicien, a été chercheur à l'Inra, unités MIG puis MaIAGE.

TATIANA ZHARINOVA ZIMMERMANN, infographiste.

JOEL POTHIER, bio-informaticien, maître de conférences à Sorbonne Université, à Paris.

Aux quatre coins de l'Hexagone

Quel est le polygone régulier qui représente le mieux la carte de la France métropolitaine et continentale ? Des calculs simples d'optimisation répondent à la question et montrent que le surnom d'« Hexagone » est plutôt usurpé.

Les Italiens nomment souvent la partie continentale de leur pays « la Péninsule », qualificatif géographique incontestable. Les médias italiens emploient aussi l'expression « la Botte » (*la Stivale*) pour désigner leur pays lorsqu'ils parlent d'économie ou de météorologie, et c'est souvent ainsi qu'en France on dénomme l'Italie. Sur une carte géographique, la ressemblance de l'Italie avec une botte est en effet frappante.

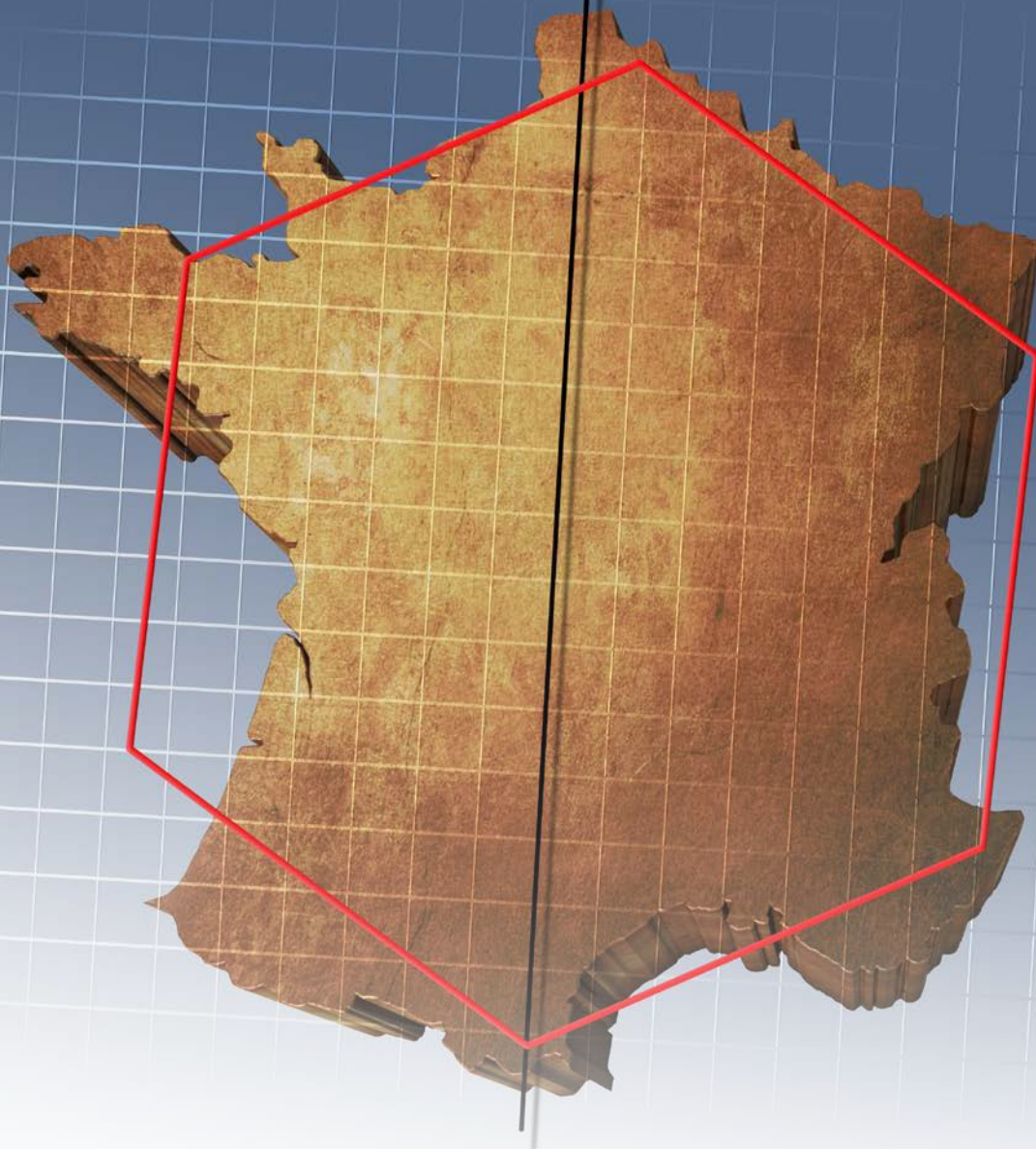
La France, elle, reçoit un nom dont la justification est bien moins évidente. « L'Hexagone » est l'antonomase utilisée très couramment dans ce pays pour désigner la France métropolitaine et continentale. On la trouve dans des titres de livres, dans la publicité, etc. D'ailleurs, le titre de cet article est un emprunt à des hommes politiques peu férus de rigueur géométrique. Or nous avons demandé à des collègues et amis étrangers « innocents » (ceux qui ne savaient pas que la France devrait être un hexagone !) à quoi ressemblait, selon eux, la carte du pays. Plus d'un quart des réponses (27%) ont évoqué une étoile à cinq branches ou un pentagone, 8% un octogone ou

un carré, mais la plupart des réponses (« une peau tannée », « un fantôme », « une tête de chien »...) correspondaient davantage à des réponses au test de Rorschach utilisé par les psychologues qu'à l'évocation d'une figure géométrique simple et élégante. Et surtout, personne n'a évoqué d'hexagone, régulier ou non.

UN MYTHE HEXAGONAL

Le mythe de l'hexagone français a plusieurs explications. Si certains géographes ont préféré un pentagone, comme Théophile-Sébastien Lavallée sous le Second Empire et Emmanuel de Martonne sous la Troisième République, ou un octogone, comme Élisée Reclus à la fin du XIX^e siècle, l'hexagone semble l'avoir emporté parce qu'il incluait plus explicitement l'Alsace et la Moselle !

Certains ont justifié ce choix en parlant de « six points saillants ». Il est incontestable que six points du plan, choisis plus au moins arbitrairement, forment un hexagone irrégulier, mais cela est peu informatif : si l'on choisissait huit points, la France ressemblerait à un octogone, et plus on choisit de points sur le contour de la France,



mieux ils représenteront la France et ils formeront toujours un polygone.

Pour que le problème de l'approximation de la France par une figure géométrique simple soit intéressant, il faut le contraindre, par exemple en se limitant aux polygones réguliers (polygones à côtés et angles égaux). L'argument affirmant que la France «s'inscrit dans un hexagone régulier» n'a pas de sens: la France, comme n'importe quel objet d'étendue finie, peut s'inscrire dans n'importe quelle figure géométrique, un triangle, un carré, un cercle... pourvu que cette figure soit assez grande.

Plusieurs questions se posent alors. Si la France devait ressembler à un polygone régulier, quelle en serait la taille et comment serait-il orienté (quelle serait son inclinaison par rapport à l'axe nord-sud)? Où se trouverait le centre du polygone? L'hexagone est-il le polygone régulier auquel la France ressemble le plus? Enfin, comment comprendre le mot «ressemble»? Nous allons ici essayer de répondre à toutes ces questions.

Il va de soi que le raisonnement doit se fonder sur la forme du bord (rivages et frontières).

L'hexagone régulier qui représente le mieux la France, en minimisant l'aire des surfaces qui débordent de l'une ou l'autre figure, a pour rayon (celui du cercle circonscrit) 550,5 kilomètres, et son inclinaison est de $3,0^\circ$ vers l'est (l'axe nord-sud est ici en noir).

le la France continentale, et pas seulement sur quelques points choisis. Mais qu'est-ce que «la France»? La France est un morceau de surface terrestre, qui est accidenté et ne tient pas dans un plan. Pour assimiler ce pays à une figure géométrique plane quelconque, il faut passer par sa représentation plane, c'est-à-dire par une carte, ou au moins une carte de son bord, numérisée.

Devant l'impossibilité d'obtenir des données exploitables de l'IGN (l'Institut national de géographie), nous avons acheté la carte Michelin routière et touristique de la France datée de 2017 (échelle 1/1000000) et nous l'avons fait numériser. En utilisant un logiciel de retouche photographique (plusieurs permettent de le faire), nous avons noté, point après point, les coordonnées (x, y) du bord de la France continentale (sans les îles côtières).

Nous avons obtenu ainsi 5250 points espacés de $1,2 \pm 0,9$ kilomètre. Ils sont moins espacés en Bretagne, dont la côte est très découpée, qu'en Normandie où la côte est souvent rectiligne. Avec une numérisation à 300 points par pouce et en tenant compte de l'épaisseur des lignes sur la carte, on peut estimer que les

Les coordonnées des points ont été obtenues avec une précision de 1 pixel, c'est-à-dire de 90 mètres environ. De cette façon, nous avons représenté «la France» par un polygone irrégulier comportant 5250 sommets.

Pour tester si la France ressemble à une figure géométrique quelconque, on pourrait découper celle-ci dans du carton et la superposer sur la carte du pays de telle façon que l'une déborde le moins possible de l'autre. Une figure trop grande couvrirait bien la France, mais elle-même déborderait trop; tandis qu'une figure trop petite ne déborderait pas, mais ne recouvrirait pas une grande partie de la France.

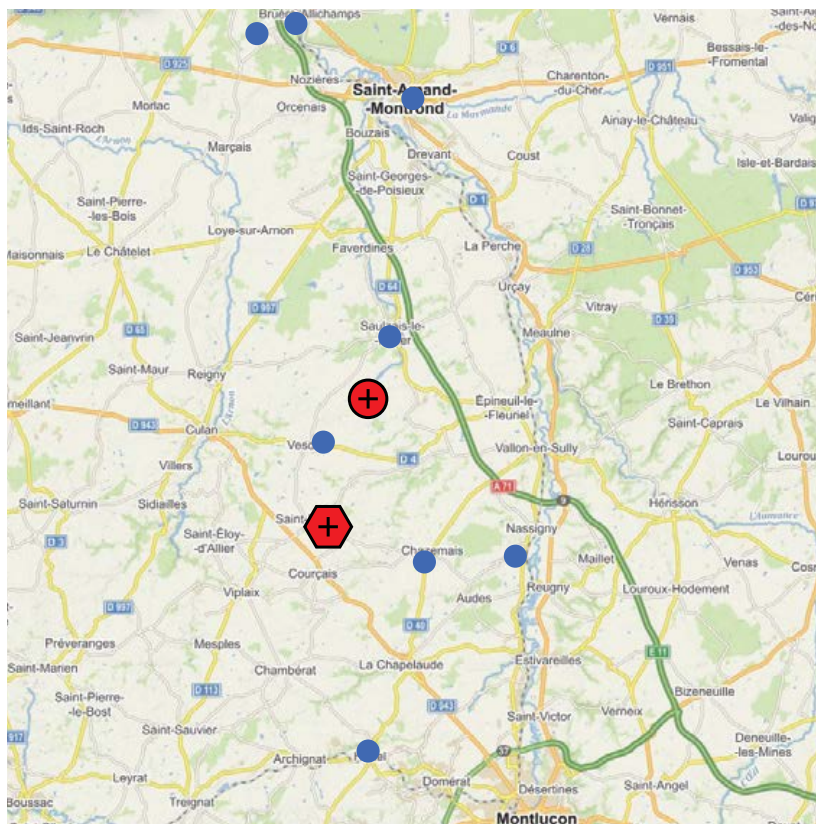
MINIMISER L'AIRES TOTALE DES DÉBOREMENTS

On peut considérer que le meilleur recouvrement est obtenu lorsque la somme des aires des débordements (ceux du polygone et ceux de la France) est la plus petite possible (voir la figure page ci-contre). Trouver, dans une famille donnée de figures géométriques (les hexagones réguliers par exemple), celle qui minimise l'aire des débordements est un problème d'optimisation.

Un polygone régulier d'«ordre» donné (c'est-à-dire ayant un nombre donné de côtés) est défini par quatre paramètres. Par exemple, on peut choisir L , X , Y , α où L est la taille du polygone, X et Y sont les coordonnées de son centre et α est l'angle qui décrit son orientation. Le problème consistant à trouver les valeurs des quatre paramètres qui rendent le polygone optimal est simple. Mais il peut receler des pièges, en particulier l'existence possible de minimums locaux. Dans notre cas, un minimum local correspond à un polygone régulier de l'ordre considéré, tel que tout léger changement des paramètres (orientation, taille, positionnement) augmente la somme des aires des débordements, alors qu'il existe un autre polygone du même ordre, de paramètres franchement différents, qui fournit un meilleur ajustement.

En pratique, on peut déterminer efficacement ces paramètres (L , X , Y , α) par une méthode d'optimisation numérique, implémentée dans des logiciels facilement disponibles. Le choix de l'aire des débordements comme critère d'optimisation rend la méthode assez robuste vis-à-vis de la densité des points choisis sur le bord de la France (pourvu qu'elle soit suffisante pour décrire correctement sa forme) ainsi que de la précision des coordonnées (x, y) des points individuels.

Avant de présenter les résultats de ces calculs d'optimisation, signalons un autre élément intéressant. Puisque l'on a représenté la France par un polygone irrégulier de 5250 côtés, on peut aussi calculer son barycentre. Il s'agit du barycentre de la France vue comme une surface plane, c'est-à-dire du centre de gravité d'un

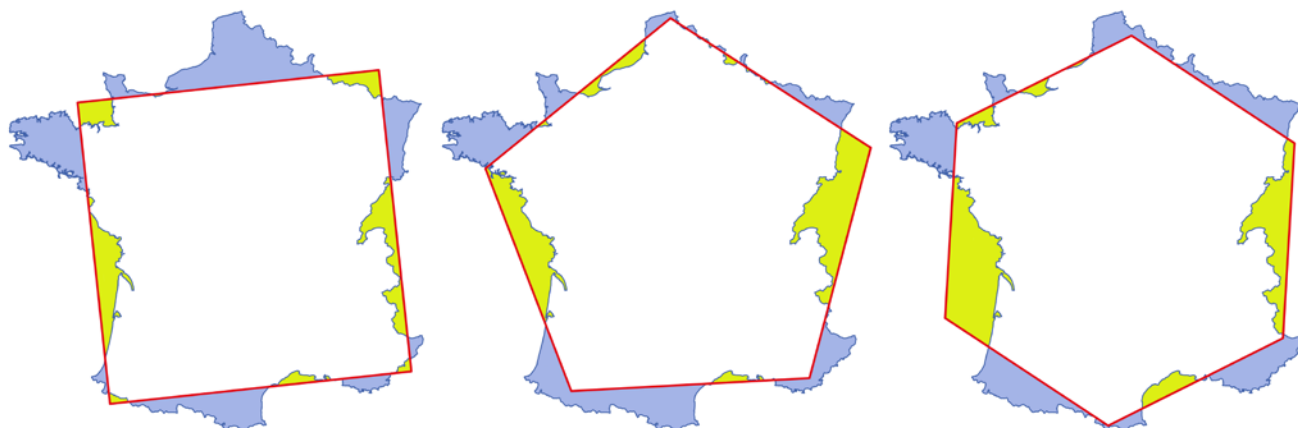


carton de densité et d'épaisseur uniformes découper en suivant le bord de la France. Plusieurs localités revendiquent déjà le titre de centre de la France. L'IGN ne précise pas sa méthode pour déterminer ce point, et les autres méthodes (utilisant, par exemple, le cercle, ou le quadrilatère minimal circonscrit, ou le cercle maximal inscrit) ne sont pas très convaincantes. Le calcul du barycentre de notre polygone défini par les 5250 points est aujourd'hui facile à faire avec un ordinateur, en utilisant les coordonnées de ces sommets.

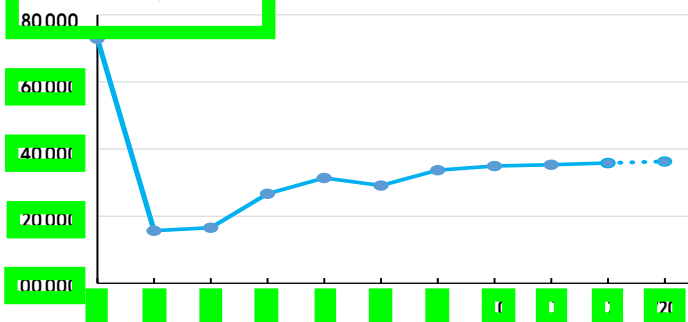
Tous les calculs, tant ceux du polygone optimal que du barycentre, ont été programmés avec le logiciel libre Scilab. La carte utilisée

Le centre de l'hexagone optimal recouvrant la France est, sur cette carte, le petit hexagone rouge à côté de la route D943. Le rond rouge entre la D4 et l'A71 est le barycentre de la France (c'est-à-dire du polygone à 5250 sommets choisis par les auteurs qui approxime la carte géographique du pays). Les ronds bleus sont les différents autres lieux qui revendiquent le titre de centre de la France.

La méthode d'optimisation est peu sensible aux imprécisions de la carte



Aire totale des débordements
(unités arbitraires)



Ordre du polygone
régulier

Ci-contre : l'aire des débordements en fonction de l'ordre (nombre de sommets) du polygone régulier optimal. Le dernier point du graphique correspond au polygone régulier à 720 sommets, qui est très proche d'un cercle. Ci-dessus : le carré, le pentagone et l'hexagone optimaux. C'est pour le carré que la somme des aires des débordements de la France (en bleu) et du polygone (en jaune) est la plus petite. Autrement dit, un carré représente mieux la France qu'un hexagone.

ainsi que la précision de l'optimisation numérique ont permis de déterminer les coordonnées du centre de l'hexagone optimal : $46^{\circ}29'49''\text{N}$, $2^{\circ}27'13''\text{E}$ à 4" près, ce qui représente une précision de l'ordre de l'hectomètre. D'après GoogleMaps, ce point se situe dans le périmètre de la commune de Saint-Désiré, dans le département de l'Allier (voir la figure page précédente).

Quant au barycentre de la France, nous avons obtenu comme position approximative les coordonnées $46^{\circ}33'54''\text{N}$, $2^{\circ}28'58''\text{E}$; il se trouve dans le périmètre de la commune de Vesdun, dans le département du Cher. Il est très proche du barycentre de l'ensemble des centres des communes de la France métropolitaine, pondéré par les superficies des communes ($46^{\circ}32'23''\text{N}$, $2^{\circ}25'49''\text{E}$). Néanmoins, le calcul de ce dernier prenait en compte les côtières, ce qui n'est pas notre cas.

On peut ainsi estimer que la position du centre de l'hexagone régulier optimal représentant la France continentale est déterminée à une centaine de mètres près et qu'il ne serait pas sérieux de la présenter avec plus de précision. Elle résulte d'un processus numérique d'optimisation où une certaine imprécision est inévitable. Les coordonnées géographiques des autres centres potentiels de la France que l'on voit mentionnés dans divers documents sont présentées avec la précision de 1", c'est-à-dire environ 31 mètres. Mais rien ne garantit que

les données de départ et surtout la méthode employée autorisent une telle précision!

Ce qui précède porte sur l'hexagone régulier, mais on peut envisager d'autres polygones réguliers susceptibles de représenter la France: un triangle équilatéral, un carré, un pentagone régulier, etc. Nous avons donc répété le calcul pour plusieurs polygones réguliers (voir les figures ci-dessus).

LE POLYGONE OPTIMAL A BIEN QUATRE COINS

Dans les résultats, on remarque par exemple que le carré optimal débord manifestement beaucoup moins de la France que celle-ci ne débord du carré. Notre critère d'optimisation, la minimisation de la somme des aires des débordements, n'implique en effet pas que les aires des débordements mutuels soient égales. Trouver le polygone régulier qui minimiserait les aires des débordements, en les maintenant égales, serait un autre problème d'optimisation et conduirait à des résultats différents.

Cependant, la principale conclusion à laquelle nos calculs conduisent est que si la France devait ressembler à un polygone régulier, ce serait de préférence un carré, voire, à défaut, un pentagone. L'hexagone ne viendrait qu'à la troisième place, suivi d'un octogone. Cela justifie les propositions de certains géographes anciens et surtout le titre de cet article: "Hexagone est carré!" ■

SUR LE WEB

Articles « **Hexagone France** », « **Centre de la France** » et « **Aire et centre de masse d'un polygone** » sur Wikipédia

Page « **Centre de gravité** » du site Math 15873 de Michel Berteau : <http://math.15873.pagesperso-orange.fr/page9.htm>

MESSAGES

Afin de limiter le réchauffement global à 1,5 °C, il faudra au cours de ce siècle extraire de l'atmosphère 1 000 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂).

Il sera crucial de trouver la combinaison optimale de méthodes de captage du carbone. Avec des machines qui extraient directement le CO₂ de l'air, il serait possible d'en retirer 250 milliards de tonnes

d'ici à 2100. La replantation de forêts permettrait de capter 80 milliards de tonnes de CO₂.

Les coûts nets vont jusqu'à 600 dollars (270 euros) par tonne. À moins que de grands marchés soient développés pour utiliser le CO₂ capté, une taxe carbone constitue peut-être la meilleure solution pour financer les technologies de captage.

AUTEUR



RICHARD CONNIFF
journaliste et écrivain
scientifique
aux États-Unis

Capter le CO₂ pour

La réduction des émissions globales de gaz à effet de serre tarde trop. Pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, il faudra probablement retirer de l'atmosphère quelque 1 000 milliards de tonnes de dioxyde de carbone d'ici à 2100. Dans quelle mesure est-ce possible ?



sauver le climat



Dans le cadre du projet CarbFix, à la centrale géothermique d'Hellisheiði, en Islande, des puits d'injection envoient dans des roches profondes de l'eau de mer contenant du CO₂ extrait de l'air.

Il n'y a pas si longtemps, on pensait qu'il suffirait de réduire nos émissions de gaz à effet de serre pour sauver le monde du changement climatique. Remplacer les centrales à énergies fossiles par des sources d'énergie propre, rendre les automobiles et les bâtiments moins énergivores, passer à l'éclairage par des LED, manger moins de viande, etc.

Réduire les émissions et promouvoir les énergies renouvelables semblait être la solution, même pour le Groupe intergouvernemental d'experts pour le climat (Giec), pas plus tard qu'en 2005. Mais cette stratégie n'a pas donné les fruits escomptés. Les émissions globales ont augmenté au lieu de diminuer. Il apparaît désormais que même l'élimination complète des émissions mondiales d'ici à 2050 ne suffira pas.

Pour empêcher une catastrophe économique et environnementale, les experts du climat affirment maintenant que nous devons parvenir à des émissions *négatives*. Autrement dit, il faudra extraire des milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère chaque année. C'est comme si l'on disait que nous ne pouvons plus sortir les poubelles, mais que nous devons aussi progressivement reprendre tout ce que nous avons mis aux ordures dans le passé.

UNE « URGENCE IMMEDIATE »

D'après une étude de 2018 dirigée par Jan Minx, de l'institut allemand MCC (institut Mercator de recherche sur les biens communs et le changement climatique), des émissions négatives et massives sont désormais considérées comme un « impératif biophysique » pour atteindre les objectifs en matière de changement climatique. Trouver les moyens d'y parvenir est une « urgence immédiate » si l'on veut limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C, prévient-il avec ses coauteurs dans la revue *Environmental Research Letters*. Presque tous les États ont souscrit à cet objectif, avec un repli à « nettement en dessous de 2 °C » dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat, conclu fin 2015.

Le réchauffement est actuellement de 1 °C environ par rapport aux niveaux préindustriels. Mais il augmente de 0,2 °C par décennie. Dans un rapport spécial d'octobre 2018, le Giec a prévenu que nous avions tout juste une douzaine d'années pour agir si nous espérons rester en deçà de 1,5 °C, le niveau considéré par la plupart des scientifiques comme la limite à ne pas dépasser pour avoir une chance de préserver le monde vivant à peu près tel que nous le connaissons.

Rester sous ce seuil impose un « budget carbone » bien précis, c'est-à-dire une quantité de CO₂ que nous pouvons ajouter à l'atmosphère sans pousser le réchauffement au-delà de cette température. Au niveau actuel des émissions, environ 40 milliards de tonnes par an, « nous



n'avons peut-être plus droit qu'à cinq années d'émissions de dioxyde de carbone » pour un réchauffement limité à 1,5 °C, disent Jan Minx et ses coauteurs. Après, chaque tonne supplémentaire de CO₂ devra être compensée par l'extraction d'une quantité égale. Cette équipe estime qu'à l'échelle mondiale, il faudra extraire de l'atmosphère entre 150 milliards et plus de 1000 milliards de tonnes de CO₂ d'ici à 2100, soit environ 2 à 16 milliards de tonnes par an à partir de 2050, la quantité augmentant notablement vers la fin du siècle.

A cette fin, notent Jan Minx et son équipe, il faudra construire chaque année « plusieurs centaines » d'installations de captage et de séquestration du CO₂ à partir de 2030, c'est-à-dire dans à peine onze ans. Cela pourrait se réaliser par le biais de grandes machines qui extraient le CO₂ de l'air, ou par le développement de centrales à biomasse, qui brûlent des arbres (cultivés en rotation continue) dans une installation qui capte le CO₂ ainsi émis et l'envoie dans les profondeurs du sol pour un enfouissement permanent. Des options simples consisteraient à replanter des forêts coupées ou à étendre des forêts existantes, à améliorer les sols cultivés et les pâturages afin qu'ils retiennent davantage de carbone, et à broyer et épandre certains types de roches qui absorbent le CO₂.

Cependant, la plupart des méthodes plus technologiques de captage du carbone en sont encore dans leurs premières phases de développement. Elles exigent d'énormes investissements, avec un risque considérable d'échec, et présentent des effets secondaires majeurs, par exemple une concurrence pour des terres déjà utilisées pour nourrir la population ou pour préserver la faune sauvage.

Et pourtant, le captage de CO₂ à grande échelle apparaît comme la seule option. Dans

cette machine de la jeune pousse Climeworks extrait du CO₂ de l'atmosphère (a). Un injecteur bibruté sous un dôme et situé à proximité (b) envoie le gaz à plus de 700 mètres sous terre, où il réagit avec des roches basaltiques pour former des carbonates, visibles sous forme de stries blanches dans un échantillon de basalte prélevé en profondeur (c).



Une étude publiée en 2017 dans *Nature Climate Change*, le statisticien Adrian Raftery, de l'université de Washington, et ses collègues ont examiné les tendances actuelles (sans prendre en compte les émissions négatives). Ils ont trouvé que nous nous dirigeons vers une hausse de 3,2 °C d'ici à la fin du siècle, la fourchette allant de 2 à 4,9 °C. Dans une étude publiée plus tard dans *PNAS*, Zangyang Xu, climatologue de l'université du Texas A&M, et un collègue estiment «catastrophique» un réchauffement supérieur à 3 °C.

peut-on mobiliser suffisamment de volontés politiques pour réaliser des émissions négatives tout en réduisant de façon draconienne nos émissions actuelles de CO₂?

CAPTER DIRECTEMENT LE CO₂ DE L'AIR ET L'ENFOUIR

Sur un champ de lave solidifiée, dans un paysage de cailloux et de mousse juste à la sortie de Reykjavik, en Islande, une machine de la taille d'un garage pour une voiture aspire l'air à travers un filtre chimique qui extrait le CO₂. Alimentée par la centrale géothermique voisine, elle injecte le carbone capturé à plus de 700 mètres sous terre, où le gaz réagit avec la roche basaltique et se transforme en un minéral solide. Climeworks, une jeune pousse suisse, affirme qu'il s'agit de la première installation du monde de captage direct dans l'air et séquestration. Elle séquestre une modeste quantité de 50 tonnes de CO₂ par an.

Le captage direct dans l'air du CO₂ et sa séquestration représentent probablement la voie la plus simple pour réaliser des émissions négatives: à l'aide d'une multitude de ventilateurs, de compresseurs et de techniques chimiques, on puiserait le CO₂ dans l'air et on l'enterrerait. D'après divers scénarios scientifiques, cette technologie permettrait d'extraire 10 à 15 milliards de tonnes de CO₂ par an d'ici la fin du siècle; quelques experts pensent qu'on pourrait atteindre 35-40 milliards de tonnes par an. La perspective est tellement alléchante que, selon de nombreux climatologues, il y a un aléa moral: celui de penser que l'on peut reporter la réduction des émissions liées aux combustibles fossiles, dans l'espoir que la technologie nous sauvera plus tard.

La plus complète des revues des méthodes d'extraction (une autre étude publiée en 2018 dans *Environmental Research Letters*) a une vision moins optimiste. Sabine Fuss, du MCC,

Le captage de dioxyde de carbone à grande échelle apparaît comme la seule option

Alors qu'un réchauffement de plus de 5 °C poserait «des menaces existentielles pour la majeure partie de la population humaine»

Supposons donc que 1000 milliards de tonnes d'émissions négatives soient nécessaires au cours de ce siècle, soit en moyenne 20 milliards de tonnes par an à partir de 2050. Quelle part du gâteau chaque méthode pourrait-elle représenter et à quel coût? Étant donné la concurrence entre les méthodes pour certaines ressources, comme les terres, quelle est la meilleure combinaison à adopter? Et

COMPARAISON DES APPROCHES

Les rectangles montrent les fourchettes déterminées par les experts sur la base de nombreuses études. La fertilisation des océans (F) n'est pas incluse.

DIFFERENTES STRATEGIES POUR CAPTER LE CARBONE

Quelles techniques séquestrent le plus de dioxyde de carbone en 2050 ? Quel serait leur coût ? Le grand carré met en perspective les différentes approches. Les chiffres effectués par l'économiste Sabine Fuss et ses collègues. Chaque petit carré présente, pour une stratégie donnée, une évaluation détaillée des études et le jugement des spécialistes de l'équipe de Sabine Fuss.

COMMENT LIRE LES GRAPHIQUES VIOLETS

Les couleurs représentent la fourchette des valeurs d'après de nombreuses études. Les teintes plus sombres indiquent un recouvrement plus important.

Accord entre les études
Potentiel de captage du carbone
faible <=> élevé
Coût du captage du carbone

5^e au 95^e percentile des estimations

Jugement des experts
auteurs de la méta-analyse

Les lignes rouges ont des repères pour aider à comparer les courbes (les carrés ayant des échelles différentes)

Les échelles des graphiques individuels (en violet) sont différentes pour uniformiser la taille des carrés et faciliter la lecture.

CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE PAR LES BIOENERGIES

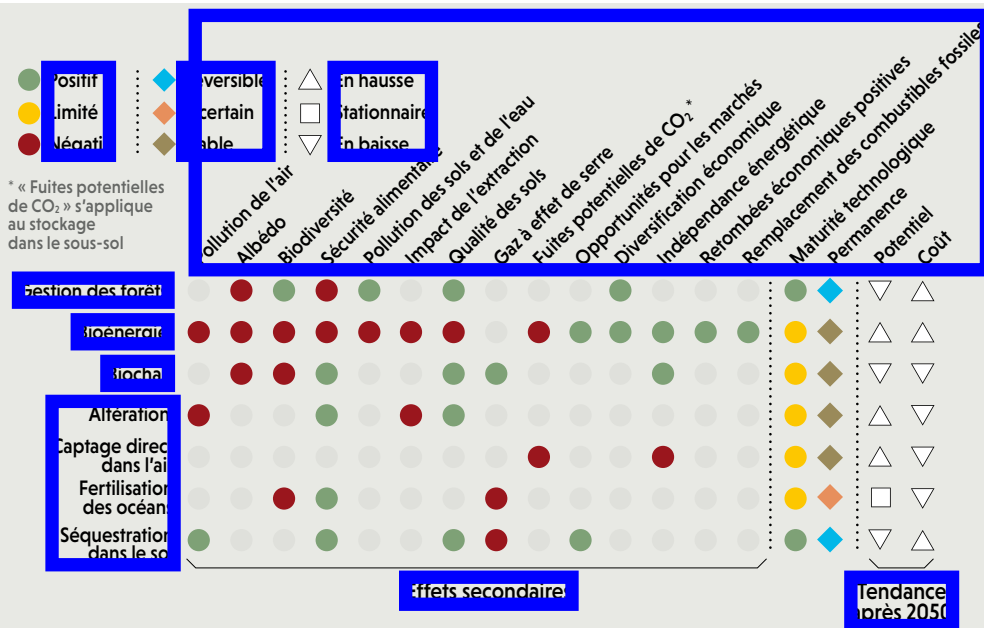
On brûle des végétaux, qui absorbent du dioxyde de carbone, pour produire de l'énergie, ou on les transforme en biocarburant. On extrait le CO₂ et on l'injecte dans le sous-sol pour un stockage profond et permanent. Les produits créent des revenus, mais en adoptant à grande échelle cette stratégie, on risque d'empiéter sur les terres nécessaires aux cultures alimentaires.

REFORESTATION ET AFFORESTATION

On plante des arbres pour remplacer les forêts coupées à blanc et étendre celles qui existent. Ces arbres absorbent le CO₂ de l'air et le convertissent en bois neuf, racines comprises. Il faudra aussi réformer les marchés du bois et les pratiques de gestion forestière.

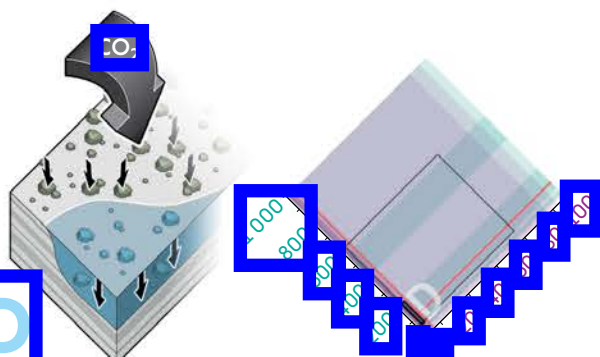
BIOCHAR

On chauffe en l'absence d'oxygène des récoltes, du fumier ou des déchets organiques. Cela produit du biocarburant et du biochar, un résidu riche en carbone ressemblant à du charbon. On épand le biochar sur des champs agricoles pour améliorer le sol, ce qui pourra contribuer à fixer davantage de carbone. Produire du biochar à grande échelle en consommant peu d'énergie risque d'être difficile.



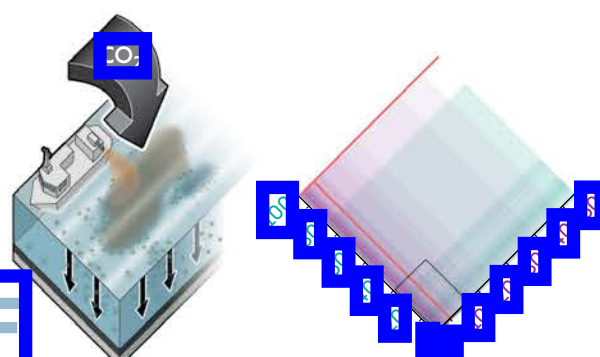
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les techniques qui capteront le carbone en 2050 (*rangées*) s'accompagneront d'éventuels effets secondaires (*ronds*). La colonne « maturité technologique » indique dans quelle mesure l'approche sera prête à être déployée à cette date. La « permanence » indique si le CO₂ peut s'échapper à nouveau dans l'atmosphère : « réversible » indique un risque élevé ; « stable » correspond à un risque faible (*carreaux*). La tendance à la hausse ou à la baisse du potentiel de séquestration et des coûts au-delà de 2050 est indiquée tout à droite du tableau (*triangles*), sur la base de facteurs tels que la disponibilité des terres. Les effets sont estimés sur la base des évaluations majoritaires des articles publiés. Lorsque peu d'articles ont traité un point particulier, les entrées correspondantes du tableau sont laissées en gris.



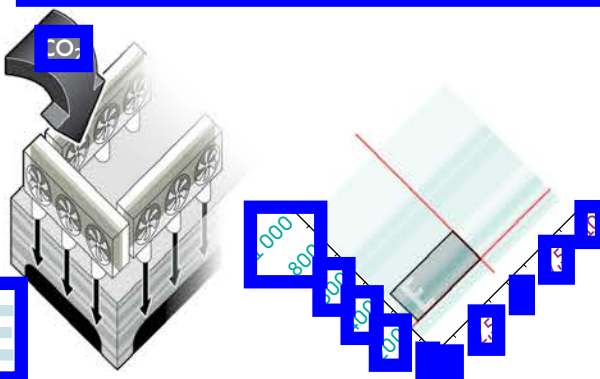
ALTÉRATION FORCÉE

On réduit en poussière de la roche. Épandue dans les champs, cette poussière capte du CO₂ de l'air et fertilise le sol. Quand on la saupoudre sur l'océan, elle réagit avec l'eau de mer, transformant le CO₂ en carbonates qui tombent sur le fond. La clé du succès est de parvenir à pulvériser et transporter la roche à peu de frais.



FERTILISATION DES OcéANS

On répand de la limaille de fer dans les mers pour favoriser la croissance du plancton, qui absorbe du CO₂. À la mort de ces organismes, le carbone qu'ils ont fixé sombre au fond de l'océan. En raison de la courte durée des gains et des risques de perturbation des écosystèmes, les experts n'ont pas intégré cette option à leur trahique synthétique (*page ci-contre*).



CAPTAGE DIRECT DANS L'AIR

Des machines aspirent l'air ambiant et séparent chimiquement le CO₂, qu'elles injectent dans le sous-sol pour stockage permanent. Les coûts prédits sont élevés, mais ils pourraient baisser avec le développement de la technologie. [Les données pour le « potentiel » n'étaient pas disponibles.]



SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LE SOL

Les graminées ou les cultures absorbent du CO₂ et le convertissent en racines, fixant le carbone dans le sol. Les techniques de gestion des sols pourraient augmenter la séquestration et le rendement des cultures. Le potentiel à long terme pourrait être limité, la quantité de carbone que les sols peuvent retenir étant limitée.

et ses collègues ont examiné les coûts, les effets secondaires, la soutenabilité environnementale et d'autres facteurs pour évaluer le potentiel de séquestration du carbone de sept principales méthodes d'extraction. Ces chercheurs évaluent le potentiel du captage direct dans l'air en 2050 à seulement 0,5 à 5 milliards de tonnes par an, ce qui donne au total 25 à 250 milliards de tonnes ce siècle, pour un coût d'environ 100 à 300 dollars la tonne. (À titre de comparaison, une voiture en Europe émet de l'ordre de 2 tonnes de CO₂ par an.)

Effectivement, le captage dans l'air « n'est pas une solution miracle », commente James Mulligan du programme *Food, Forests & Water* (« Alimentation, forêts et eau ») de l'institut des ressources mondiales (WRI). « Mais nous en avons besoin. » Certains chercheurs pensent qu'on pourrait abaisser le coût en dessous de 100 dollars (90 euros) la tonne. Mais si le temps nécessaire pour développer la technologie à l'échelle requise est comparable aux soixante années qu'il a fallu aux panneaux solaires pour passer des satellites des années 1950 à un usage répandu aujourd'hui, « il sera peut-être un peu tard », fait observer Jan Minx.

En outre, le captage direct dans l'air consomme beaucoup d'énergie. Pour extraire 1 million de tonnes de CO₂ par an, il faudrait une centrale électrique fournissant 300 à 500 mégawatts, d'après Jennifer Wilcox, professeure de génie chimique au Worcester Polytechnic Institute, aux États-Unis. Si cette centrale est à charbon, on aura davantage d'émissions positives que négatives. Si l'énergie provient de fermes solaires ou éoliennes, celles-ci couvriront beaucoup de terres à vocation agricole ou d'espaces naturels. Et, bien sûr, 1 million de tonnes ne serait qu'une goutte d'eau par rapport aux 20 milliards de tonnes annuelles visées.

Il est peut-être essentiel de construire aujourd'hui de telles installations afin de développer le savoir-faire nécessaire pour passer à beaucoup plus grande échelle et de parvenir à une meilleure efficacité plus tard dans le siècle. « Mais si vous vous mettiez aujourd'hui à construire des équipements qui captent 20 millions de tonnes par an, ce serait gaspiller votre argent », dit Roger Aines, directeur scientifique du programme sur les énergies au laboratoire américain Lawrence-Livermore. « Vous auriez besoin de beaucoup d'énergie solaire ou éolienne, et si vous aviez à votre disposition toute cette énergie solaire ou éolienne, le mieux à faire pour la planète serait de l'envoyer sur le réseau et de fermer une centrale à charbon. » Empêcher de nouvelles émissions de gaz à effet de serre reste la priorité des priorités.

L'étude de Sabine Fuss ne se contente pas d'additionner le potentiel des sept méthodes de captage, car certaines d'entre elles sont en compétition pour les mêmes ressources. Par



exemple, trop de reforestation se ferait au détriment de terres nécessaires pour cultiver le combustible des centrales à bioénergie, et trop de bioénergie pourrait être en concurrence avec le captage direct dans l'air pour la séquestration souterraine du carbone. En d'autres termes, il nous faut optimiser un portefeuille de méthodes.

et engrais, du biochar, a été produit par chauffage de déchets de poulets et de copeaux de bois. Ces déchets mettraient du dioxyde de carbone en les laissant se décomposer.

OPTIMISER LE PORTEFEUILLE DE SOLUTIONS

Une façon immédiate de commencer à construire ce portefeuille, explique Pete Smith, spécialiste des sols et du changement global à l'université d'Aberdeen, en Écosse, est de « passer à l'échelle supérieure pour ce que l'on sait déjà faire. On sait planter des arbres. On sait restaurer les tourbières, essentiellement en élevant le niveau de l'eau », de telle sorte que la tourbe capture du CO₂ au lieu d'en émettre. « On sait comment améliorer le contenu en carbone du sol. [...] Encourager ce type d'initiatives est (relativement) facile et pourrait être fait immédiatement. Cela nous ferait déjà avancer dans la bonne direction. »

Prenons par exemple la reforestation. Les forêts tropicales du globe sont hélas devenues une source plutôt qu'un puits pour les émissions de CO₂, soit que l'on y coupe et brûle les arbres, soit que les forêts ravagées se dégradent. Pour ramener les forêts en régime d'émissions négatives, il faudrait d'abord réformer en profondeur le marché international du bois, qui est fortement influencé par le commerce illégal.

Au-delà de ça, les lieux qui s'imposent à l'évidence pour replanter sont les terrains que l'on a défrichés pour des cultures ou pour le pâturage, mais que l'on a abandonnés parce qu'ils se sont révélés improductifs. En restaurant 5 millions de kilomètres carrés de terrains de ce type, on pourrait séquestrer 3,7 milliards de tonnes de CO₂ par an si des fonds suffisants y étaient consacrés, selon une étude publiée en 2015 dans *Nature Climate Change* et dirigée

par Richard Houghton, du centre de recherche le Woods Hole, aux États-Unis.

En retransformant en forêts toutes les terres qui avaient été défrichées pour en faire des pâturages, on produirait jusqu'à 10 milliards de tonnes d'émissions négatives par an, selon Bronson Griscom, directeur de la science du carbone forestier de l'ONG The Nature Conservancy. C'est une part non négligeable de la récupération du CO₂ nécessaire chaque année. Mais cette mesure suppose une baisse mondiale de la consommation de viande, ce qui va à l'encontre de la tendance actuelle.

Sabine Fuss et ses coauteurs prédisent un potentiel plus modeste. La quantité de CO₂ séquestré déclinera quand les forêts arriveront à maturité et que leur croissance sera ralentie. Et il faut compter l'impact des incendies, de la déforestation et du changement climatique. Mais même en prenant en compte ces facteurs limitants, l'expansion des forêts pourrait constituer une mesure de transition critique, en attendant que le captage direct dans l'air et d'autres technologies se développent à grande échelle. Sabine Fuss évalue un potentiel compris entre 0,5 et 3,6 milliards de tonnes par an de CO₂ ainsi capturé dès le

adoptant un système de rotation des pâturages, le pacage pourrait être plus productif tout en améliorant le stockage du carbone dans les sols. Sabine Fuss estime qu'en améliorant la séquestration dans les sols, on aurait des émissions négatives de 5,3 milliards de tonnes de CO₂ par an (265 milliards de tonnes pour l'ensemble du xxi^e siècle) pour moins de 100 dollars la tonne.

Cela s'ajouterait au biochar. Dans cette forme d'extraction du carbone, un four spécialisé chauffe en l'absence d'oxygène de la biomasse, ce qui a pour effet de la transformer en une sorte de charbon tout en générant des produits dérivés utiles tels que de l'huile pyrolytique ou du gaz. En appliquant du biochar aux champs, on fixe du carbone dans le sol et on améliore le rendement des cultures. Mais personne n'a encore essayé de déployer le biochar à grande échelle. Sabine Fuss et ses coauteurs le considèrent comme un puits plausible de 0,3 à 2 milliards de tonnes de CO₂ par an, pour un coût allant de 90 à 120 dollars la tonne. En intégrant sur le siècle, cela ferait 100 milliards de tonnes.

Une autre approche est celle de la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS). Les plans initiaux de nombreux pays pour atteindre leurs engagements dans le cadre de l'accord de Paris en dépendent, mais cette approche est très controversée. Une centrale brûle du bois, des déchets agricoles ou d'autres formes de biomasse, comme du millet vivace (*Panicum virgatum*). Ces sources extraient du CO₂ de l'atmosphère lorsqu'elles poussent et se multiplient. La combustion le libère à nouveau, et la centrale le récupère à la sortie de la cheminée, pour l'expédier dans des formations géologiques profondes pour un stockage permanent.

Mais la reforestation pour la production de biocombustible à l'échelle envisagée par certains partisans se ferait au détriment des surfaces arables disponibles, d'où une menace sur la production alimentaire et la préservation de l'environnement, ainsi que sur l'extraction du carbone par d'autres méthodes telles que la reforestation et la séquestration dans le sol. De plus, le fait de récupérer les émissions à la sortie de la cheminée réduit fortement le rendement de la centrale, du moins avec les techniques actuelles. C'est pourquoi Sabine Fuss n'estime pas le rendement soutenable de la BECCS à plus de 2 milliards de tonnes par an, bien au-dessous des prédictions d'autres chercheurs, pour un coût de 100 à 200 dollars la tonne. Cette estimation conduit à 100 milliards de tonnes d'émissions négatives d'ici à 2100.

Deux dernières méthodes de captage du carbone restent à présenter. L'altération forcée exploite un processus naturel: le CO₂ de l'air se convertit en carbonate quand il est exposé à

Les forêts pourraient absorber jusqu'à 3,6 milliards de tonnes de CO₂ par an

milieu du siècle. Cela pourrait couvrir 25 à 180 des 1 000 milliards de tonnes à extraire au cours de ce siècle, pour un coût compris entre 5 et 50 dollars la tonne de CO₂.

Avec une meilleure gestion, on pourrait augmenter les gains. Bronson Griscom note par exemple que les sylviculteurs du sud-est des États-Unis coupent sciemment les pins à torches (*Pinus taeda*) plusieurs années avant qu'ils atteignent leur production optimale. En leur permettant de vendre des crédits carbone pour couvrir les années supplémentaires de croissance, on pourrait retarder les coupes jusqu'à l'âge optimal, ce qui augmenterait la quantité de bois, donc celle de carbone stocké.

De même, en faisant pousser des plantes qui fixent l'azote dans les pâturages et en

➤ certains types de roches broyées. La question est de savoir si les chercheurs peuvent trouver un moyen économique de réduire en poudre des roches adéquates, afin d'accélérer le processus naturel. Sabine Fuss estime le potentiel à 2 à 4 milliards de tonnes par an, pour 50 à 200 dollars la tonne.

Enfin, son équipe conclut que la fertilisation des océans (saupoudrer du fer ou d'autres nutriments dans l'océan pour stimuler la croissance d'algues et autres éléments du plancton, qui absorbent du CO₂) serait une solution trop inefficace et à trop court terme pour justifier les potentiels effets secondaires sur les écosystèmes.

PRÉFÉRER DES BÉNÉFICES PLUTÔT QU'ENDOSSER DES COÛTS

Que conclure de toutes ces estimations ? En additionnant les fourchettes de l'étude de Sabine Fuss, on arrive à un total compris entre 150 milliards et un peu plus de 1000 milliards de tonnes d'ici à 2100. Ce dernier chiffre pourrait donner l'impression que la solution du problème climatique est à notre portée. Mais on ne peut pas simplement ajouter les chiffres, à cause de la concurrence entre les différentes méthodes. Ce que l'on peut faire, explique Sabine Fuss, c'est gérer le portefeuille pour tirer parti des recouvrements bénéfiques – par exemple déployer l'altération forcée sur les terres où est cultivée la biomasse de la BECCS.

Ce dont toutes ces méthodes ont besoin, affirment les scientifiques, c'est un investissement massif dans la recherche et le développement. Mais les gouvernements ont rechigné à payer la facture des technologies à émissions négatives à cause de la résistance idéologique à « choisir des gagnants » et parce que certains des investissements passés ont été des échecs notoires. Le département de l'Énergie des États-Unis, par exemple, a dépensé en vain des fortunes sur des projets de captage du carbone destinés à faire des centrales à charbon « propres ».

Une « taxe carbone » permettrait d'éviter de devoir choisir des gagnants en imposant un coût aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Cela créerait une motivation financière à la fois pour réduire les émissions maintenant, et plus tard pour aller récupérer les émissions passées. Le Royaume-Uni a imposé une taxe de ce type, actuellement à environ 25 dollars la tonne, qui porte principalement sur les centrales à combustibles fossiles ; cela a eu pour effet de diviser par deux les émissions liées au charbon entre 2015 et 2016. Mais la plupart des gouvernements répugnent à une telle taxation, considérant qu'elle est trop radicale pour les économies qui reposent sur les combustibles fossiles.

À de rares exceptions près, les grandes sociétés ont également rechigné à investir dans

des technologies de captage du CO₂ parce que, jusque récemment, elles ne voyaient pas de marché. Pour elles, guérir le climat sert l'intérêt général, mais ne constitue pas une source de profits. Mais cela est peut-être en train de changer grâce à un bouquet d'incitations fiscales (étonnamment bipartisan) approuvé par le Congrès des États-Unis au début de 2018. La législation dite 45Q augmente notablement les crédits d'impôts que les entreprises peuvent réclamer dans les douze prochaines années, pas seulement pour capturer le CO₂ et le séquestrer dans le sol (avec une remise d'impôts allant jusqu'à 50 dollars par tonne), mais aussi pour utiliser le CO₂ de diverses façons.

L'utilisation la plus controversée est la « récupération améliorée (ou assistée) du pétrole » : une compagnie pétrolière achète du CO₂, le transporte par pipeline et l'injecte dans ses puits de pétrole en voie d'épuisement, afin de récupérer du pétrole que l'on ne pourrait pas extraire de manière classique. Une telle solution au changement climatique qui suggère de produire davantage de carburants fossiles peut sembler assez orwellienne, et certains critiques environnementaux ont accusé le 45Q de n'être rien d'autre qu'un programme déguisé de subvention des combustibles fossiles. Mais la récupération améliorée du pétrole semble effectivement réduire les émissions actuelles

Investir massivement dans la recherche et le développement de ces méthodes est nécessaire

parce que le CO₂ capturé, typiquement issu de raffineries de gaz naturel ou d'éthanol, est séquestré dans le sous-sol.

Certains défenseurs de l'environnement, comme Kurt Waltzer, de la Clean Air Task Force, soutiennent que transformer le captage du carbone en une technologie relative aux énergies, et non simplement une technologie relative aux émissions, est le premier pas vers une adoption à grande échelle par le marché de l'extraction du CO₂. Cela transforme le CO₂ recapturé en un produit à vendre et à acheter, plutôt que seulement un coût à subir – peut-être la clé des futures émissions négatives.

Un portefeuille de méthodes de captage du carbone, de taxes et de marchés permettrait-il d'atteindre l'objectif de 1000 milliards de tonnes d'ici à 2100? La surchauffe de l'été 2018 aura peut-être marqué un tournant. L'Ouest américain était en feu. Sur quatre continents, on a connu des canicules sévères. Les climatologues ont abandonné leur discours prudent et préviennent, dans *PNAS*, qu'un accroissement du réchauffement risque de faire basculer la planète vers une «Terre-serre chaude... vraisemblablement incontrôlable et dangereuse pour de nombreuses populations». Au cas où ce message ne serait pas assez fort, l'un des principaux auteurs de l'article, Hans Joachim Schellnhuber, directeur émérite de l'institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK), en Allemagne, a déclaré aux journalistes que les effets en cascade pourraient conduire à un monde qui ne pourrait plus faire vivre que 1 milliard d'humains, bien loin des 7,5 milliards actuels.

Pour certains dirigeants politiques, encore aujourd'hui, le changement climatique ne serait pas une certitude, en dépit des preuves indiscutables d'un présent alarmant et d'un avenir qui s'annonce plus sombre encore. Ce

qui est déconcertant avec les technologies d'émissions négatives, c'est qu'il y ait tant d'incertitudes même pour les scientifiques eux-mêmes. «Chacun fait valoir à quel point tout dépend du substrat, de la partie du monde où vous vous trouvez, des précipitations qui y tombent et de la température», commente ainsi Stephanie Roe, écologue à l'université de Virginie, à propos de l'enrichissement du sol en carbone.

IL EST GRAND TEMPS DE COMMENCER

Les chercheurs débattent aussi de savoir s'il sera possible de développer l'une ou l'autre des méthodes de captage du carbone jusqu'à atteindre des milliards de tonnes par an. «On discute peut-être un peu trop de l'échelle finale à atteindre», dit Brendan Jordan, de l'institut des Grandes Plaines, à Minneapolis. «Je crains que cela ne nous paralyse.» Autrement dit, nous devons commencer à réaliser des émissions négatives malgré les incertitudes, parce qu'elles sont triviales comparées à un monde dans lequel le jeu des chaises musicales du changement climatique s'arrêterait, et où 6,5 milliards de personnes, voire plus, n'auraient pas de place où s'asseoir. ■

BIBLIOGRAPHIE

1. C. Minx et al., **Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis**, *Environmental Research Letters*, vol. 13(6), article 063001. 2018.

2. J. Fuss et al., **Negative emissions – Part 2: Costs, potentials, and side effects**, *Environmental Research Letters*, vol. 13(6), article 063002. 2018.

3. W. Steffen et al., **Trajectories of the Earth system in the Anthropocene**, *PNAS*, vol. 115(33), pp. 8252-8259. 2018.

4. W. Griscom et al., **Natural Climate Solutions**, *PNAS*, vol. 114(44), pp. 11645-11650. 2017.

la nature arctique dans un climat d'urgence

colloque

vendredi 12 avril de 14h à 18h
— samedi 13 avril de 10h à 18h

©Rény Marion

cité

sciences
et industrie

La biodiversité arctique n'a pas d'équivalent sur Terre, ni à plus basse latitude ni même en Antarctique. Quel est l'impact de l'évolution du climat sur la nature arctique? Quels changements observe-t-on sur la végétation, le rythme du lemming, le comportement des orques ou du renard polaire? Communications scientifiques et témoignages révèlent les réalités du terrain.

Entrée gratuite dans la limite des places disponibles.

Avec notamment :

Isabelle Autissier, présidente du WWF France;
Jean-François Lagrot, grand reporter photographe
Aude Lalis, maître de conférences au Muséum national d'Histoire naturelle;
Esther Levesques, professeur, université du Québec à Trois-Rivières;
Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue, co-présidente du GIEC, France;
Jérôme Moreau, Groupe de recherches en Écologie Arctique (GREAA), France;
Olivier Truc, écrivain et journaliste, correspondant à Stockholm, Suède.

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris
M° Porte de la Villette M° 3b Cité des sciences et de l'industrie

Vénus

Pourquoi est-elle si différente de la Terre?

Atmosphère irrespirable, pression gigantesque, température infernale... Alors que Vénus est née dans des conditions similaires à celles de la Terre, elle a évolué très différemment. Cette planète offre cependant un éclairage unique sur les débuts de la tectonique des plaques terrestre ainsi que sur les chances d'apparition de la vie ailleurs dans l'Univers.

LES AUTEURS



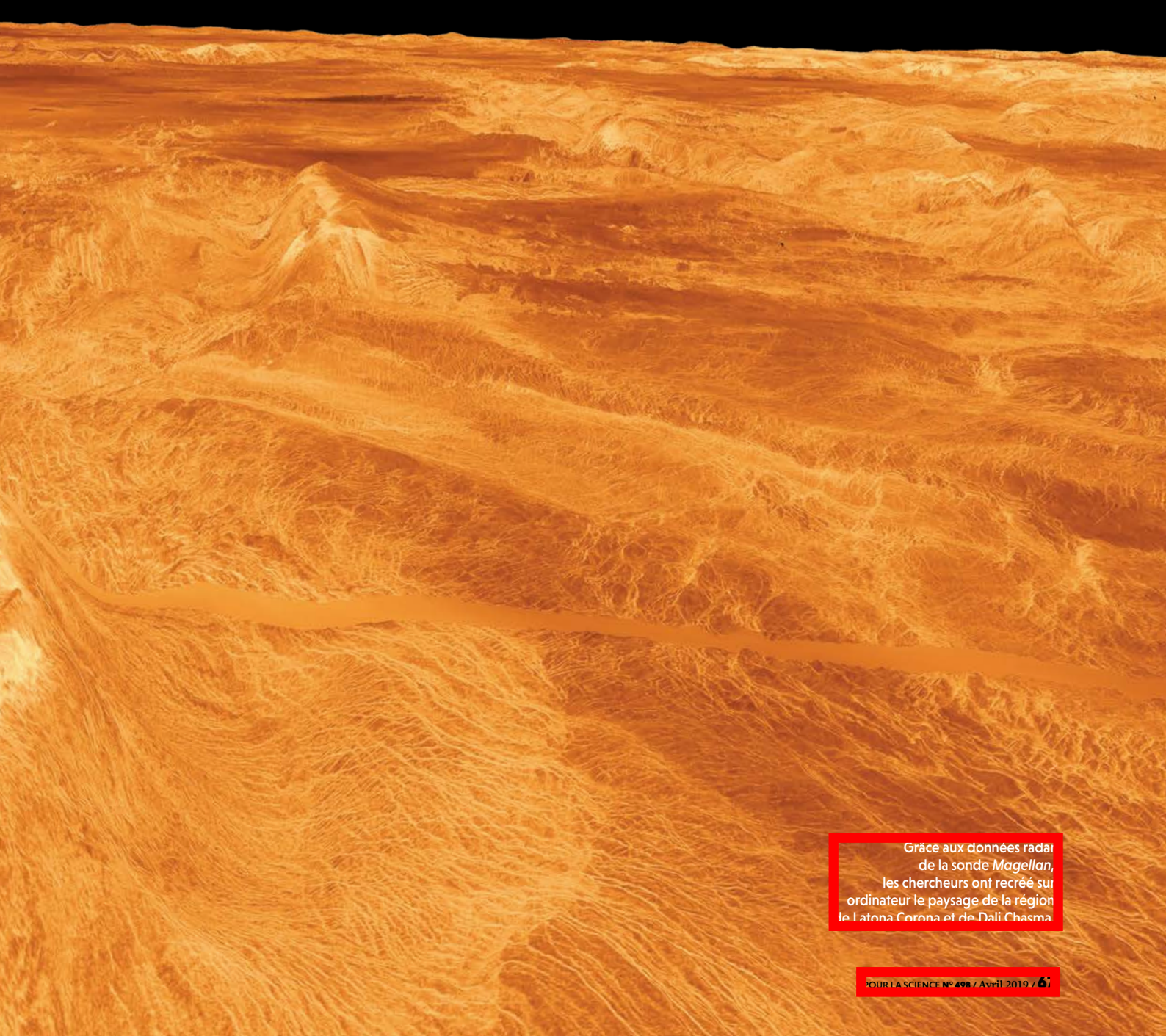
M. DARBY DYAR
Directrice de recherche à
l'Institut de science planétaire
et professeure d'astronomie
au Mount Holyoke College,
aux États-Unis



SUZANNE E. SMREKAR
Directrice de recherche
et responsable adjointe de
la mission *Insight* de la Nasa
au Jet Propulsion Laboratory,
à Pasadena, en Californie



STEPHEN R. KANE
Maître de conférences
en planétologie
au département des sciences
de la Terre de l'université
de Californie à Riverside



Grâce aux données radar
de la sonde *Magellan*,
les chercheurs ont recréé sur
ordinateur le paysage de la région
de la terna Corona et de Dali Chasma.

L'ESSENTIEL

Vénus et la Terre, à l'origine très semblables, ont connu des destins divergents.

La Terre abrite des océans, une atmosphère riche en oxygène et héberge la vie.

Vénus, en revanche, est devenue inhospitalière. Elle est cependant géologiquement active, avec du volcanisme actif et une tectonique

Comprendre pourquoi Vénus a évolué de cette façon nous donnerait des indices sur les possibilités que la vie existe ailleurs, sur des exoplanètes semblables à Vénus.

Une nouvelle mission vénusienne est nécessaire pour percer les secrets de cette planète. Des projets sont à l'étude.

En 1982, une onde de choc a parcouru le département de science planétaire du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis) : la mission vedette de la Nasa, *Voir* (pour *Venus orbital imaging radar*) venait d'être annulée. L'une d'entre nous (Darby Dyar) était alors étudiante en thèse. Elle se souvient que les jeunes doctorants pleuraient dans les couloirs et que les chercheurs plus âgés secouaient la tête, abattus. La nouvelle administration Reagan avait entrepris des coupes budgétaires dans l'exploration spatiale, et la mission *Voir* était l'une des victimes.

Malgré ce revers, les scientifiques n'ont pas perdu espoir. Ils ont revu leurs plans et mis au point un projet de mission moins coûteux (680 millions de dollars) avec une sonde constituée d'éléments récupérés sur d'autres projets. C'est ainsi qu'en 1989, la sonde *Magellan* s'est élancée pour une mission de reconnaissance de Vénus. Au cours des cinq années qui ont suivi, la sonde a renvoyé des images radar, des données gravitationnelles et une carte topographique de la quasi-totalité de la surface de la deuxième planète du Système solaire. Mais en 1994, *Magellan* a achevé sa mission en plongeant dans l'atmosphère de Vénus, et cet événement a marqué la fin de l'intérêt et du soutien de la Nasa pour l'exploration de cette planète.

Pendant plus de dix ans, Vénus n'a fait l'objet d'aucune mission spécifique. Les mesures de *Magellan* sont restées pendant toute cette période les seules sources de données géophysiques de cette planète. Puis, de 2006 à 2014, la sonde *Venus Express* a principalement étudié l'atmosphère de Vénus. Elle a aussi observé l'activité volcanique et fourni les éléments pour comprendre pourquoi la Terre et Vénus ont évolué différemment (voir l'encadré page 72). En 2015, la sonde japonaise *Akatsuki* a pris le relais et scrute encore l'atmosphère vénusienne. Dans le même temps, les scientifiques ont analysé de façon plus détaillée les données de *Magellan*.

L'ensemble de ces nouvelles données nous ont poussés à revoir quelques idées que nous avions de cette planète. Il est aujourd'hui clair que les volcans sont omniprésents sur Vénus. Et nous avons trouvé des indices d'un début de tectonique des plaques, phénomène que les spécialistes estimaient critique pour l'habitabilité d'une planète. De nouveaux modèles théoriques suggèrent aussi que Vénus aurait eu de l'eau liquide à sa surface jusque relativement tard dans son histoire, ce qui signifie qu'elle aurait offert des conditions hospitalières pour la vie beaucoup plus longtemps qu'on ne le pensait.

UNE « EXOPLANÈTE » À DEUX PAS DE CHEZ NOUS

Cette évolution dans notre compréhension de Vénus coïncide avec un autre développement spectaculaire de l'astrophysique : la découverte de milliers de planètes appartenant à d'autres systèmes stellaires, dont certaines ont une taille de l'ordre de celle de Vénus, et qui sont situées à une distance comparable de leur étoile. Tout ce que nous apprendrons de Vénus nous renseignera aussi sur ces mondes lointains et inaccessibles. En particulier, si nous parvenons à déterminer si (et quand) Vénus a présenté les conditions requises pour héberger la vie, nous en saurons davantage sur la probabilité que la vie se développe sur la pléthore d'exoplanètes qui parsèment la Voie lactée.

La plupart des exoplanètes ont été découvertes grâce à la méthode des transits : les astronomes observent les étoiles pour déceler des baisses périodiques et caractéristiques de leur éclat. Ces variations de luminosité se produisent quand des planètes en orbite autour de ces étoiles passent devant elles et occultent une partie infime (mais mesurable) de leur lumière. Par cette technique, on peut déterminer la taille d'une planète lointaine, mais cette grandeur ne définit pas à elle seule les caractéristiques d'une planète. Par exemple, si un

Vénus aurait hébergé de l'eau liquide pendant près de 2 milliards d'années

DES NUAGES D'ACIDE SULFURIQUE

Sur cette image de Vénus composée à partir des données de la sonde japonaise *Akatsuki*, on observe la présence d'épais nuages d'acide sulfurique. Leur opacité rend difficile l'observation de la surface de la planète.

Un observateur extraterrestre lointain étudiait le système solaire par la méthode des transits, Vénus et la Terre lui paraîtraient quasi identiques. Et pourtant, alors que la Terre est habitable depuis près de quatre milliards d'années, Vénus est inhospitalière.

Un autre paramètre important à prendre en compte est la distance à l'étoile. La «zone habitable» est la région autour d'une étoile où une planète rocheuse pourrait avoir de l'eau liquide à sa surface (voir l'encadré page 70). La Terre, à l'évidence, est dans cette zone. Vénus a été dans cette zone autrefois, et même assez longtemps. Mais les frontières de la zone habitable bougent : elles s'éloignent du Soleil au fil du temps, car la luminosité de ce dernier augmente avec son âge. Vénus est désormais sortie de la zone habitable et occupe ce qu'on nomme la «zone de Vénus». Dans cette région, l'énergie thermique due au rayonnement du Soleil chauffe beaucoup l'atmosphère de la planète, au point que l'effet de serre s'emballe. La température continue d'augmenter, et l'eau des océans finit par bouillir et s'échapper de la planète.

Même si Vénus était un peu plus proche du Soleil que la Terre, on peut dire que toutes les deux se sont formées dans des conditions très similaires. Elles ont toutes deux été bombardées par des comètes qui y ont probablement apporté de l'eau. Par ailleurs, le vent solaire (le flux de particules éjectées à grande vitesse de l'atmosphère solaire) a formé une mince couche d'ions hydrogène à la surface des deux planètes. Et quand ces dernières se sont formées dans le disque de poussière primordial, elles ont capté les mêmes matières volatiles (des composés chimiques qui se vaporisent facilement).

En 2016, Michael Way, de l'institut Goddard de la Nasa, et ses collègues ont utilisé les données topographiques de *Magellan* pour simuler le climat passé de Vénus. Leurs résultats indiquent que la surface de la planète aurait hébergé de l'eau liquide, et peut-être plus tôt que la Terre. Et cette eau serait restée présente jusqu'à il y a environ un milliard d'années.

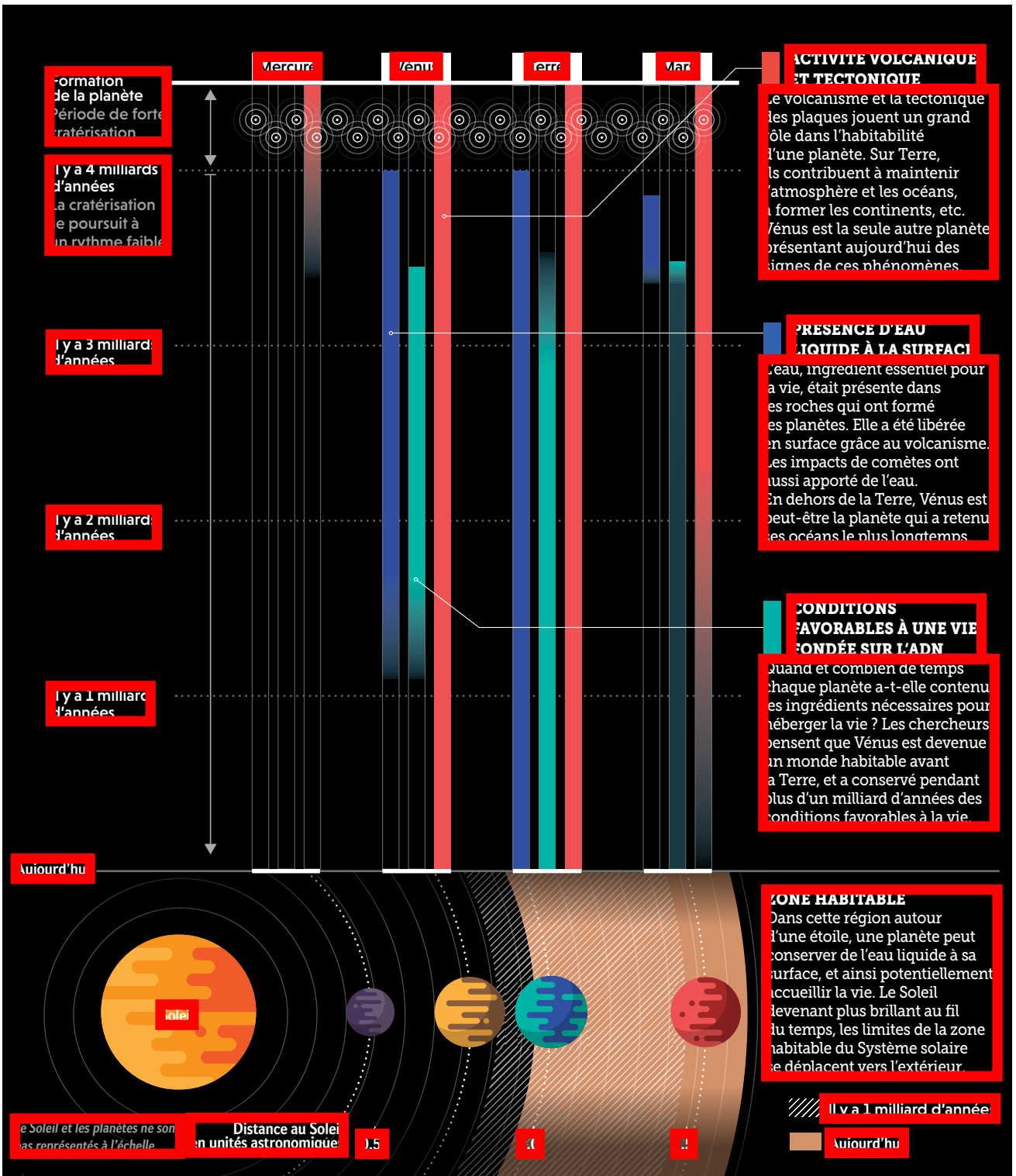
Il n'en reste pas moins que Vénus est aujourd'hui extrêmement inhospitalière. Que s'est-il passé ? Vénus représente-t-elle l'état final ?

DES HISTOIRES PLANÉTAIRES SI DIFFÉRENTES

Quels sont les facteurs qui contribuent à rendre une planète habitable ? C'est l'une des grandes questions de l'astronomie.

Sur Terre, les conditions ont évolué au fil du temps, mais l'une abrite une vie florissante tandis que l'autre est un désert inhospitalier. En étudiant le développement du volcanisme,

de la tectonique des plaques et d'autres conditions régnant sur Vénus, les scientifiques veulent comprendre pourquoi cette planète a évolué ainsi. Et ils espèrent aussi déterminer les chances que de la vie se développe ailleurs, sur des exoplanètes qui partagent les mêmes caractéristiques que Vénus.



de toutes les planètes habitables, ou bien seulement un futur possible parmi d'autres pour les planètes de cette taille? C'est pour répondre à ces questions essentielles, et bien d'autres, que nous voulons retourner voir Vénus.

UNE SURFACE BIEN CACHÉE

L'étude de Vénus est en partie limitée par le fait qu'elle se dissimule sous une épaisse atmosphère. En altitude, des nuages d'acide sulfurique particulièrement opaques enveloppent la planète (voir la photographie page 69). Au sol, la pression de l'atmosphère est d'environ 93 bars (ce qui est comparable à la pression qui règne dans les océans terrestres à environ 900 mètres de profondeur). L'atmosphère y est si dense que son principal constituant, le dioxyde de carbone, se comporte comme un fluide supercritique, aux propriétés intermédiaires entre celles d'un gaz et celles d'un liquide.

Les scientifiques pensent que cette atmosphère a été autrefois semblable à celle de la Terre. La faiblesse du champ magnétique serait en partie responsable de la différence d'évolution des deux planètes. Pour plusieurs raisons (faible vitesse de rotation, faible gradient de température interne), aucun processus de dynamo générant un champ magnétique planétaire n'est à l'œuvre dans le noyau de Vénus. En l'absence d'un tel champ protecteur, Vénus a été exposée au vent solaire qui a éliminé l'eau

sont posés dans les années 1970 et 1980. Ces sondes n'ont survécu que quelques minutes aux conditions extrêmes, mais cela a suffi pour réaliser des analyses de composition chimique du sol, qui ressemble à du basalte et du granite terrestres. Au-delà de ces relevés, notre connaissance de la minéralogie de surface repose sur des interprétations controversées de mesures radar effectuées par *Magellan* et sur notre connaissance limitée des réactions chimiques entre les roches de la planète et les gaz atmosphériques aux températures et pressions qui règnent sur Vénus.

Récemment, les chercheurs ont montré qu'il est possible de cartographier les minéraux de Vénus depuis l'espace en regardant à travers plusieurs «fenêtres» du spectre électromagnétique où la lumière visible n'est pas absorbée par l'atmosphère. Par chance, ces fenêtres coïncident avec des longueurs d'onde qui permettent d'identifier des minéraux planétaires typiques, comme l'olivine et le pyroxène (souvent présents dans le basalte). La sonde européenne *Venus Express* a utilisé l'une de ces fenêtres pour produire la première carte de la chaleur rayonnée par la surface de la planète pour une grande partie de l'hémisphère Sud. Cette carte comprend des caractéristiques spectrales (des pics et des minima de lumière et de chaleur) qui fournissent de nouveaux indices sur la nature des minéraux au sol.

Cette carte indique aussi de nombreux points chauds, des régions émettant tellement de chaleur que l'explication la plus plausible est un volcanisme récent. C'est une découverte passionnante, parce qu'elle montre que contrairement à la Lune, inerte depuis longtemps, et Mars, où le volcanisme moderne est au mieux isolé, Vénus est encore active.

UNE TECTONIQUE DES PLAQUES?

Sur Terre, le volcanisme est souvent associé à la tectonique des plaques, c'est-à-dire la dynamique de déplacements et de glissements de grandes portions de la croûte qui recouvre le globe. La tectonique des plaques est responsable de la plupart des caractéristiques géologiques de notre planète. Elle est aussi le moteur de cycles climatiques longs, qui se jouent sur des périodes d'environ 100 millions d'années et qui ont permis à la vie d'apparaître sur Terre.

La tectonique des plaques a conduit à la formation de croûtes neuves au niveau des dorsales océaniques et à l'enfoncement de plaques dans le manteau (grâce à ces deux processus, la Terre a perdu une partie de sa chaleur interne et s'est refroidie jusqu'à un point où la vie est devenue possible). La tectonique a aussi contribué au recyclage de composés volatils tels que l'eau, le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre. Ces composés étaient d'abord rejetés dans l'atmosphère grâce au

La pression atmosphérique à la surface de Vénus est d'environ 93 bars

de l'atmosphère, en la dissociant en ions hydrogène et oxygène et en emportant ces derniers dans l'espace. Sans eau en surface pour dissoudre le dioxyde de carbone et d'autres gaz qui s'échappent en continu de l'intérieur de la planète, ces composés se sont accumulés dans l'atmosphère, ce qui a renforcé l'effet de serre. Cela explique que les températures de surface sur Vénus sont actuellement proches de 460°C, de quoi faire rougeoier les roches.

Les seules données recueillies à la surface de Vénus dont nous disposons sont celles des quatre atterrisseurs soviétiques *Venera*, qui s'y

SOUS L'ŒIL DES SONDES VENUS EXPRESS ET AKATSUKI



PIERRE DROSSART
Directeur de recherche
du CNRS au Lesia (observatoire
de Paris-PSL, Sorbonne
Université, univ. Paris-Diderot)

En orbite polaire autour de Venus, la mission *Venus Express* de l'Agence spatiale européenne a scruté la planète pendant huit ans, d'avril 2006 à décembre 2014. Bien que dédiée principalement à l'étude de l'atmosphère et de l'environnement ionisé de Venus, cette mission a aussi fourni des informations sur la surface de la planète, notamment grâce à son instrument *Virtis*. Ce spectro-imageur infrarouge a été développé conjointement par le Lesia, l'Observatoire de Paris, l'Institut d'astrophysique et de planétologie spatiale, à Rome, et le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique, à Berlin.

En mesurant l'émission thermique de surface à une température moyenne (l'environ 460 °C) diffusée à travers les nuages, cet instrument a produit des cartes thermiques détaillées de la surface de Venus. La résolution spatiale est de l'ordre de 50 kilomètres à certaines longueurs d'onde où l'atmosphère est assez transparente. Les variations de température enregistrées ont d'abord été utilisées pour reconstruire le relief de la surface, bien connu par ailleurs, grâce à l'altimétrie radar de *Magellan*.

Pendant certaines régions présentent des anomalies de température qui ne sont pas reliées à l'altitude de surface. Des anomalies, constatées dans des régions géologiques particulières, sont plutôt interprétées comme des « anomalies d'émissivité ». Elles sont liées à la texture particulière de la surface de ces régions. Il ne s'agit pas d'écoulements de lave, car ces derniers se refroidissent très

vite et ont peu de chances d'être observés. Ainsi, les anomalies thermiques traduisent probablement la présence de régions géologiquement jeunes (environ 250 000 ans, voire moins), non érodées par l'activité chimique et dynamique de Venus. Elles signalent donc la présence d'un volcanisme géologiquement récent.

La question d'un volcanisme actif encore présent sur Venus est dès lors posée. D'autres indices, tels que la variabilité pluriannuelle du dioxyde de soufre dans l'atmosphère observée par l'instrument *Sofir/Spicav* de *Venus Express*, renforcent l'hypothèse d'éruptions volcaniques de grande ampleur. Des missions futures devront confirmer l'activité volcanique de Venus.

Mise en orbite équatoriale en décembre 2015, la sonde *Akatsuki* de l'agence spatiale japonaise est dédiée aux observations climatiques de l'atmosphère de Venus. Ses observations météorologiques ont débuté en 2016, prenant le relais de celles effectuées par *Venus Express*.

Les premiers résultats complets des observations, publiés en 2018, apportent des informations précieuses sur la dynamique planétaire. Jusqu'à présent, seule la dynamique globale de l'atmosphère avait été étudiée. Grâce à ses caméras infrarouges, la sonde *Akatsuki* commence à identifier les phénomènes plus localisés comme, récemment, les structures dans les nuages de basse altitude dont la dynamique a été reproduite dans des simulations.

Nous n'en sommes qu'aux prémices de la compréhension de cette « jumelle » de la Terre au destin si différent

volcanisme, puis réinjectés dans le manteau quand des plaques ont glissé sous d'autres. Le cycle des composés volatils contribue à limiter leur accumulation dans l'atmosphère. Sans le volcanisme terrestre, il y aurait eu peu d'eau en surface et pas de lieux adaptés à l'apparition de la vie. Par ailleurs, les continents, où la vie a évolué hors de l'eau, sont aussi un produit de la tectonique des plaques. Pour ces raisons et bien d'autres, la tectonique des plaques joue un grand rôle dans la dynamique et l'habitabilité d'une planète, et il importe donc de déterminer si Venus a une tectonique des plaques active.

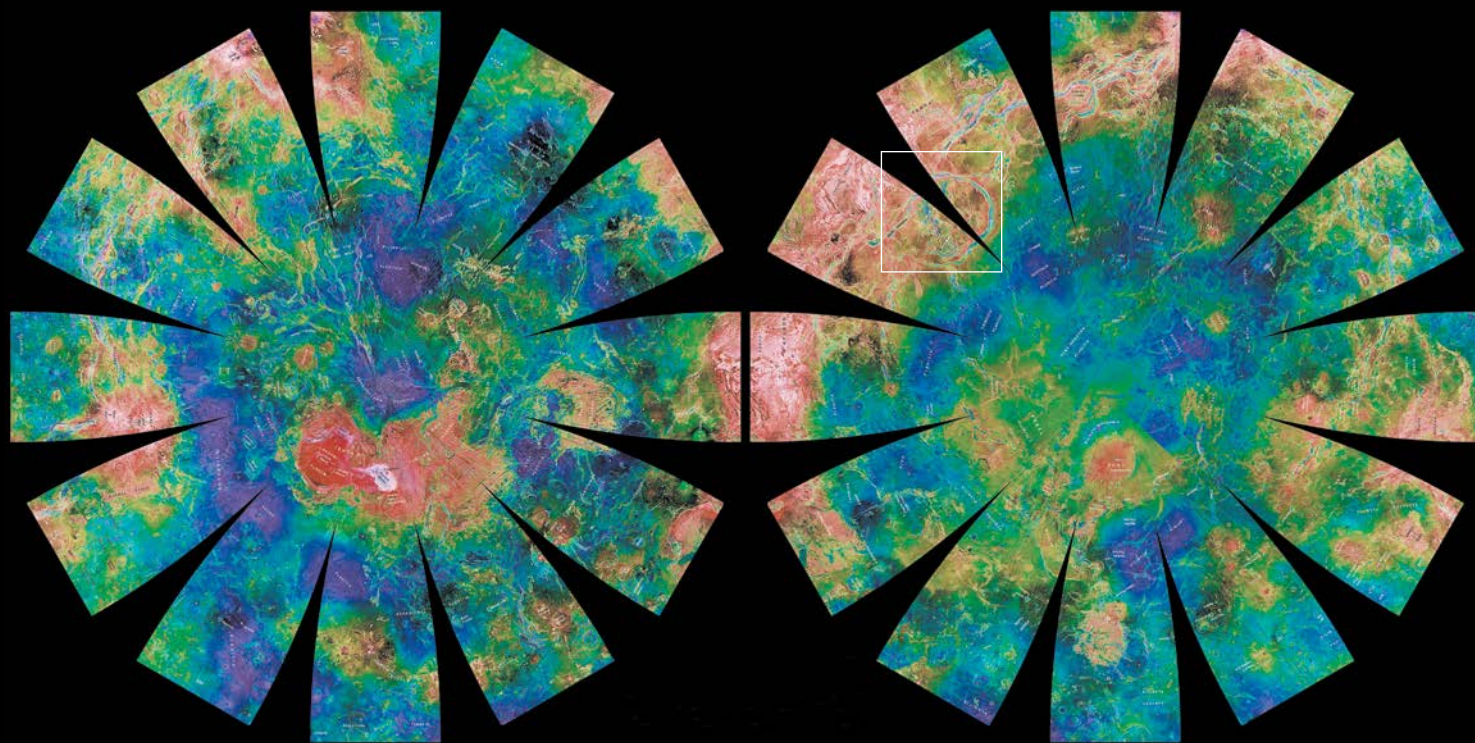
Sur Terre, la tectonique des plaques aurait démarré il y a 4 milliards d'années, mais le nombre d'indices est limité. Nous ne savons pas vraiment comment une planète opère sa transition d'un monde couvert de basalte (avec éventuellement des océans) à un système complexe de plaques en mouvement.

L'une des hypothèses dominantes est que des « bulles » de roche chaude venant des profondeurs de la Terre, sous la forme de panaches, auraient « éclaté » à la surface et ainsi enclenché la subduction, c'est-à-dire le glissement d'une plaque sous une autre. Plus précisément, en remontant, un panache chaud fragiliserait la lithosphère (la croûte et la partie supérieure du manteau) et pousserait vers le haut, ce qui ferait craquer la surface (créant un « rift »). La pression de la tête du panache créerait un volcanisme violent, comme on l'observe à la fois sur Terre et sur Venus. Le matériau du panache arrivé en surface pèserait sur la lithosphère craquelée. Il ferait alors sombrer cette couche et déclencherait une subduction. Si ce processus se répète assez souvent, les plaques de subduction s'assemblent, et la tectonique des plaques s'enclenche.

LE PANACHE DE VENUS

Ce scénario d'amorce de la tectonique est-il en cours sur Venus ? Les caractéristiques actuelles de la croûte vénusienne, chaude et mince, ressemblent à celles de la croûte terrestre quand la tectonique y a démarré. En outre, des structures géologiques de Venus ressemblent à celles de zones de subduction terrestres. Un exemple est Artemis Corona (voir la figure page ci-contre), une formation circulaire près de l'équateur de Venus qui rappelle par sa taille et sa forme l'arc des Aléoutiennes, situé dans l'océan Pacifique, au large de l'Alaska, et associé à une zone de subduction. Les chercheurs suggèrent qu'Artemis Corona a les caractéristiques d'un point chaud, où un panache du manteau arrivant à la surface a amorcé un processus de subduction.

De récentes expériences en laboratoire et des simulations numériques appuient l'hypothèse que les panaches provoquent un phénomène de subduction dans la région où la pression fait craquer la couche supérieure de la croûte.



Par exemple, l'une de nous, Suzanne Smrekar, Anne Davaille, du laboratoire Fast à l'université Paris-Sud, et Steven Tomlinson, de l'université de Californie à Los Angeles, ont reproduit la configuration d'Artemis Corona en utilisant une solution colloïdale avec des nanoparticules. Ces expériences indiquent qu'avec l'accumulation de matériau du panache, la lithosphère se scinde en fragments triangulaires, comme une feuille de papier quand elle est transpercée par la pointe d'un crayon. Quand la lithosphère coule, les fractures continuent de s'étendre. Si deux lignes de fractures venaient à se rejoindre, une plaque se formerait et un processus de tectonique s'amorcerait.

Pour l'instant, les images de ces structures sur Vénus sont de résolution trop faible pour être interprétées avec certitude. Les observations de *Magellan* ne montrent aucun signe de plaques interconnectées; nous voyons plutôt des endroits isolés où la subduction commence, dans chaque cas autour d'une de ces régions circulaires où émergeraient des panaches. Mais si cette idée se confirme, nous assisterions à la première phase du développement de la tectonique des plaques sur Vénus. Deux questions se posent alors: pourquoi la tectonique des plaques ne s'est-elle pas mise en place plus tôt, et comment évoluera-t-elle? Une piste de réponse est que, lorsque Vénus était plus chaude, les roches, plus plastiques, absorbaient les contraintes sans se fracturer. À plus basse température, les failles s'installeraient plus durablement, pour atteindre à terme un phénomène de tectonique global comme sur Terre. Le fait d'assister aux débuts de la tectonique des plaques sur Vénus indique

que ce processus est peut-être assez répandu sur les exoplanètes en voie d'habitabilité.

Comme les techniques d'imagerie et de spectrométrie ont beaucoup progressé ces dernières années, c'est le bon moment pour envoyer une nouvelle mission vers Vénus. Les motivations scientifiques sont nombreuses: mieux comprendre le volcanisme, examiner plus en détail la tectonique des plaques naissante, établir l'influence des conditions atmosphériques extrêmes de Vénus sur son évolution, etc. Dans un autre registre, nous avons découvert des structures plissées à la surface de la planète, les tessères, dont l'origine nous échappe. Sont-elles des vestiges d'une époque ancienne où l'eau coulait sur Vénus?

En 2019, la Nasa fera un appel à projets pour la prochaine génération de sondes du programme *Discovery*. Deux d'entre nous (Suzanne Smrekar et Darby Dyar) pilotent l'une de ces propositions de mission: *Veritas* (pour *Venus emissivity, radio science, InSAR, topography, and spectroscopy*). La sonde embarquera plusieurs instruments, dont un imageur et un spectromètre, afin de dresser une carte topographique de résolution bien supérieure à tout ce qui s'est fait jusqu'à présent et d'effectuer un relevé précis de la composition de la planète. La décision sera prise en 2021.

Près de trente ans après la mission *Magellan*, nous avons esquissé pourquoi Vénus et la Terre ont évolué différemment. Une nouvelle génération de chercheurs est prête à répondre de façon définitive à cette question... et peut-être à déterminer les conditions nécessaires à l'émergence de la vie dans l'Univers. ■

Les cartes géologiques de l'hémisphère Nord et Sud de Vénus ont été dressées grâce aux données des sondes *Magellan* et *Venera*. Elles montrent diverses caractéristiques, dont le cercle d'Artemis Corona (dans le cadre), qui témoigneraient des débuts de la mise en place d'une tectonique des plaques.

BIBLIOGRAPHIE

A. Davaille et al., **Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus**, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 349-355, 2017.

M. J. Way et al., **Was Venus the first habitable world of our Solar system ?**, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(16), pp. 8376-8383, 2016.

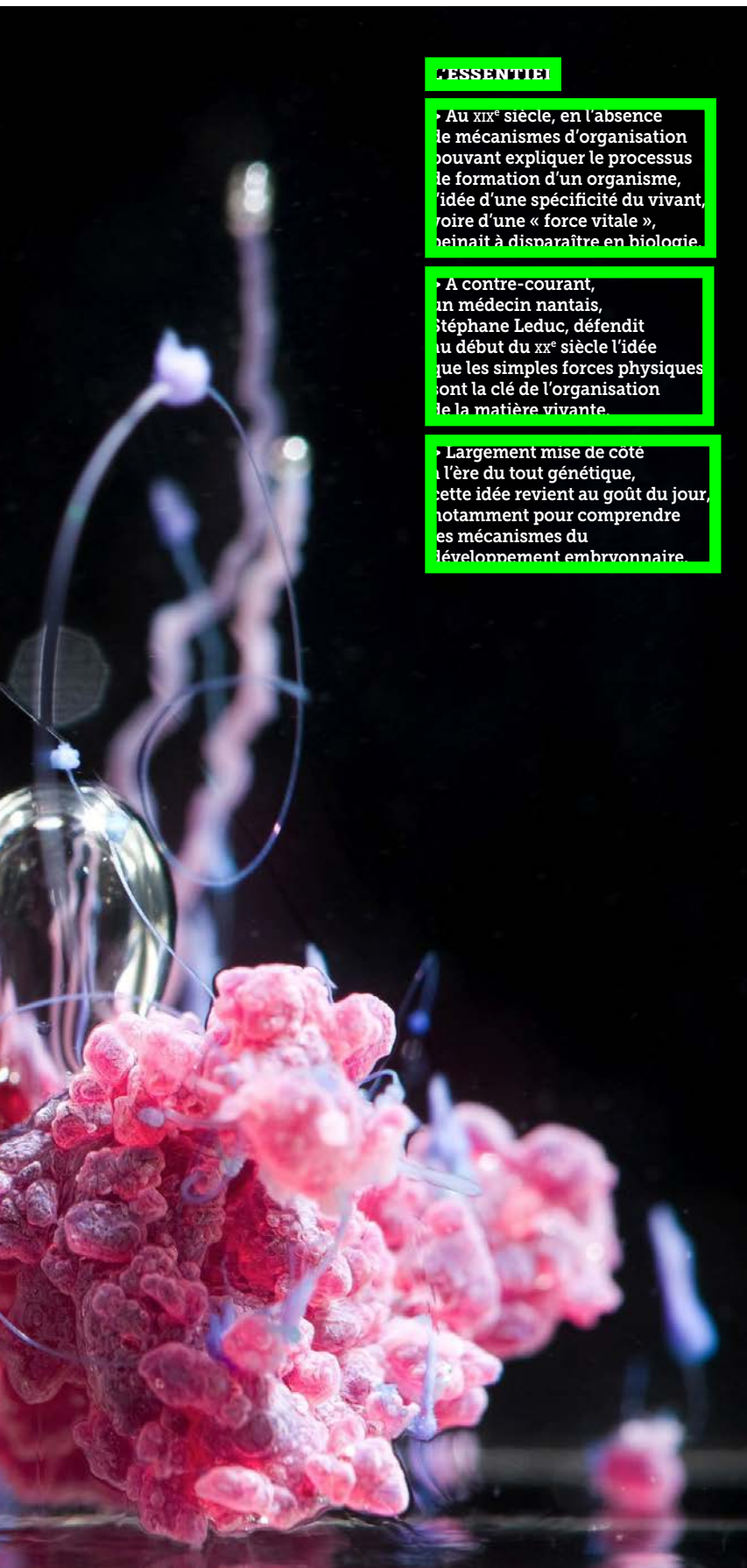
S. E. Smrekar et al., **Recent Hotspot Volcanism on Venus from VIRTIS Emissivity Data**, *Science*, vol. 328, pp. 605-608, 2010.

M. Bullock et D. Grinspoon, **Le climat variable de Vénus**, *Pour la Science*, n° 259, mai 1999.

Dans les jardins chimiques de Stéphane Leduc

Ensemencez une solution concentrée de silicate de sodium avec des sels de cobalt (ici du chlorure de cobalt), et attendez. Vous verrez bientôt apparaître des structures emblables à des coraux ou des algues sous-marines... dans un jardin chimique pourtant garanti sans forme de vie.





L'ESSENTIEL

► Au XIX^e siècle, en l'absence de mécanismes d'organisation pouvant expliquer le processus de formation d'un organisme, l'idée d'une spécificité du vivant, voire d'une « force vitale », ne devait pas disparaître en biologie.

► A contre-courant, un médecin nantais, Stéphane Leduc, défendit au début du XX^e siècle l'idée que les simples forces physiques sont la clé de l'organisation de la matière vivante.

► Largement mise de côté à l'ère du tout génétique, cette idée revient au goût du jour, notamment pour comprendre les mécanismes du développement embryonnaire.

MAURICE



RAPHAËL CLEMENT

chargé de recherche du CNRS au sein de l'institut de biologie du développement de Marseille, à Aix-Marseille Université

Et si la physique et la chimie suffisaient à expliquer les formes du vivant ? Tombée dans l'oubli, cette idée défendue par le médecin Stéphane Leduc dans les années 1910 revient en force.

Par quels mécanismes un organisme vivant, système d'une complexité physique étourdissante, émerge-t-il à partir d'un état initial très peu organisé ? De tout temps, cette ques-

tion a constitué un défi conceptuel majeur. C'est ainsi que vers 1900, un professeur de l'école de médecine de Nantes, Stéphane Leduc, s'en est emparé à son tour. Sa conviction était que la physique et la chimie suffisaient à elles seules à expliquer beaucoup de choses. Pour le prouver, il conçut des expériences de physique où des formes jusque-là supposées spécifiques du vivant émergeaient spontanément. Selon lui, ces formes témoignaient des « facultés d'organisation » des forces physiques ordinaires qui présidaient à la formation d'un organisme.

Avec l'avènement de la génétique, les idées de Leduc furent oubliées au XX^e siècle. Aujourd'hui, cependant, elles prennent tout leur sens à l'heure où l'utilisation de concepts physiques explose en biologie du développement : elles préfiguraient le concept moderne d'autoorganisation.

Comprendre les mécanismes de génération d'un organisme lors de son développement embryonnaire est une préoccupation centrale de la science, aujourd'hui essentiellement dévolue à la génétique et à la biologie dite du développement. Cette question a pourtant aussi intéressé nombre de physiciens classiques, de philosophes et de théologiens par le passé. Deux grands paradigmes ont divisé les penseurs pendant des siècles. L'épigenèse est la théorie selon laquelle un organisme acquiert sa complexité progressivement à travers la croissance et les modifications successives d'un germe ou d'un œuf. Elle suppose que les parties futures de l'organisme ne figurent pas encore en tant que telles dans le germe initial. La préformation, au contraire, suppose que la formation d'un organisme résulte du déploiement dans l'espace de parties préformées dans le germe, faisant de ce dernier une sorte de version miniature de l'organisme achevé.

ÉPIGENÈSE OU PRÉFORMATION ?

Ce débat, ouvert par Aristote, qui défendait l'épigenèse, a duré jusqu'au XIX^e siècle. Au XVIII^e siècle, l'épigenèse avait ainsi la faveur du plus grand nombre quand le savant néerlandais Antoni van Leeuwenhoek observa pour la première fois un spermatozoïde, ce qui remit la préformation au goût du jour : comment un animal adulte dans toute sa complexité aurait-il pu se former à partir d'un objet aussi primaire ? Son confrère Nicolas Hartsoeker suggéra que le futur animal était préformé dans le corps du spermatozoïde ou dans l'œuf.

Cette théorie plut à l'Eglise, qui trouvait tout fait à son goût l'idée que toutes les générations à venir étaient emboîtées dans les premiers hommes et animaux créés par Dieu. Au XVIII^e siècle, la préformation avait donc le vent en poupe, comme en atteste l'entrée « Génération (Physiologie) » de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert : après avoir relaté l'histoire des idées sur le sujet de Platon au XVIII^e siècle, son auteur, le médecin Arnulphe d'Aumont, y recense les arguments en faveur de celle la plus en vogue au moment où il écrit, selon laquelle « les œufs contiennent les rudiments du fœtus », « la semence du mâle » servant à les « vivifier ».

Cependant, le débat était loin d'être clos. Des voix dissonantes continuaient à se faire entendre, comme Pierre Louis Moreau de Maupertuis qui, dans sa *Vénus Physique*, défendait l'idée d'une attraction physique plus forte entre les parties embryonnaires appelées à devenir voisines dans l'organisme achevé. Au début du XIX^e siècle, les progrès de la microscopie permirent à l'embryologiste germano-balte Christian Heinrich von Pander d'observer pour la première fois les feuilletés embryonnaires, des territoires cellulaires distincts appelés à constituer les futurs tissus et organes. Cette découverte, ainsi que l'émergence de la théorie cellulaire, selon laquelle tous les



organismes sont constitués d'une ou plusieurs petites unités nommées cellules, sonnèrent le glas de la théorie de la préformation, du moins dans sa forme littérale.

Au XIX^e siècle, l'épigenèse bénéficiait donc d'un large consensus. Pourtant, elle manquait d'un mécanisme causal expliquant l'organisation d'une masse initiale informe de cellules en un organisme structuré. De nombreux scientifiques firent alors appel à une forme ou une autre de « force vitale », vecteur commode de l'organisation de l'embryon lors du développement.

Précurseur du vitalisme et épigéniste, le physiologiste allemand Caspar Wolff fit appel

Stéphane Leduc (1853-1939), professeur à l'école de médecine de Nantes, était un chercheur reconnu par ses pairs jusqu'à ce qu'il se mette à défendre la génération spontanée. Pourtant, ses réflexions sur l'apparition de la vie sur Terre sont toujours d'actualité.

La vie est un phénomène dont le mécanisme ne peut être que purement physique

Stéphane Leduc



Stéphane Leduc effectuait lui-même plusieurs expériences de « croissance osmotique », produisant de façon artificielle des formes ressemblant à des champignons (ci-dessus) ou des plantes : « Lorsqu'une substance soluble en solution concentrée est plongée dans un liquide formant avec elle un précipité colloïdal, osmotique, elle s'entoure d'une couche de précipité qui forme une membrane osmotique [...], inégalement perméable pour les différentes substances [et surtout] perméable à l'eau », explique-t-il dans sa *Théorie physico-chimique de la vie* (1910). Les substances à l'intérieur créent une forte pression osmotique qui pousse la membrane et fait croître la structure...

dès 1759 à une *vis essentialis* et déclara dans sa *Theoria Generationis* que tous ceux qui croyaient en l'épigenèse étaient nécessairement vitalistes. Louis Pasteur, un siècle plus tard, affirma sa conviction que la fermentation était irréductible à la chimie ordinaire et était donc un phénomène vital. Plus tard encore, le philosophe Henri Bergson rejeta, dans son *Évolution créatrice*, les interprétations mécanistes du vivant, faisant appel à son fameux « élan vital » et défendant la spécificité du vivant.

À contre-courant du vitalisme, cependant, se construisait à la fin du XIX^e siècle un nouveau courant mécaniste. Suivant l'idée partagée par le naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck que la vie devrait émerger des seuls principes physiques et chimiques, plusieurs « morphogénistes », comme Moritz Traube, Denis Monnier ou Carl Vogt, cherchaient à générer, par des expériences purement physiques, des structures propres à la vie, notamment des cellules artificielles.

Au tout début du XX^e siècle, Stéphane Leduc, médecin et physicien nantais spécialiste d'électrophysiologie et de radiothérapie, s'appropriait cette thématique émergente. Leduc souhaitait aussi combler l'absence de mécanisme dans la théorie de l'épigenèse : « La doctrine [de la sélection naturelle] nous montre comment les variations acquises sont transmises et accentuées par la sélection, mais elle ne nous montre pas comment ces variations sont acquises. La même ignorance règne d'ailleurs sur les raisons

physiques du développement ontogénique, c'est-à-dire de l'évolution embryonnaire », écrivait-il en 1910 dans son ouvrage *Théorie physico-chimique de la vie et générations spontanées*.

Outre ce livre, Leduc a publié à la même époque une série d'articles et d'ouvrages dans lesquels il fustige le vitalisme, qu'il assimile à du mysticisme, selon lui encore omniprésent en biologie : « Le vieil anthropomorphisme, le finalisme, le merveilleux, le métaphysique, l'extra et l'ultrascientifique ont persisté, dans les sciences biologiques, sous des formes et à des degrés divers. On y admet l'existence d'un principe indépendant de la matière, ou d'une force vitale spéciale à la vie, le finalisme s'y rencontre partout », dénonce-t-il en 1912 dans son livre *La Biologie synthétique*. Il recommande l'adoption du « physicisme », une démarche expérimentale analogue à celle des sciences physiques, non spécifique au vivant, et donc fondamentalement mécaniste : « L'observation nous montre que partout les forces et les lois de la nature s'exercent avec une régularité absolue, excluant tout arbitraire, tout choix, toute intention, [...] tout finalisme [...]. Partout, dans les sciences de la nature, la condition du progrès est le remplacement du mysticisme par le physicisme. »

PAS DE FRONTIÈRE ENTRE LE VIVANT ET L'INANIMÉ

Joignant l'acte à la parole, Leduc conçut de nombreuses expériences fondées sur la diffusion et la croissance osmotique, assez proches des « jardins chimiques », des structures minérales aux formes étonnantes que l'on obtient par précipitation (voir la photographie page 74). Il rapporte la formation spontanée de formes similaires à des formes vivantes – plantes, champignons (voir la photographie ci-dessus), cellules – et de comportements supposés spécifiques au vivant, comme la segmentation d'un milieu en cellules ou la division cellulaire (voir l'encadré page 78). Deane Butcher, dans la préface de l'ouvrage de Leduc intitulé *The Mechanism of Life* (1911), traduction augmentée de sa *Théorie physico-chimique de la vie*, écrit : « Il n'y a, je crois, pas de spectacle plus magnifique et éclairant que celui d'une croissance osmotique : un corps brut de matière inanimée qui germe devant nos yeux, [...] sans la moindre présence de matière organique. » Si diffusion et osmose suffisent à générer des structures complexes, régulières, et qui plus est ressemblant à celles du vivant, pourquoi alors invoquer d'autres « forces mystérieuses » ?

« La vie est un phénomène dont le mécanisme ne peut être que purement physique ; elle est produite par les mêmes forces, régie par les mêmes lois qui agissent sur le monde non vivant. [...] Le problème de la biologie, c'est de comprendre le jeu des forces physiques sur la matière des êtres vivants », défend Leduc dans *La Biologie*.

synthétique. Il remplace ainsi les forces vitales par des forces physiques: «Les forces physiques ont les facultés d'organisation infiniment plus grandes que celles qu'avaient osé supposer jusqu'ici les esprits les plus audacieux.» Leduc questionne la spécificité même du vivant, mettant en exergue le flou de la ligne de démarcation entre vivant et inanimé: «Puisqu'on ne peut marquer la séparation entre la vie et les autres phénomènes de la nature, on devrait conclure que cette séparation n'existe pas, ce qui est conforme à la loi de continuité entre tous les phénomènes. Les divisions, les séparations sont faites par l'homme pour se faciliter l'étude de la nature», écrit-il dans *Théorie physico-chimique de la vie et des générations spontanées*.

LE LÉCUC L'INCOMPRIS

En cherchant à faire tomber la barrière entre matière vivante et matière inerte, cependant, Leduc rencontra une résistance vitaliste farouche, ou du moins une grande réticence à traiter le vivant indistinctement de l'inanimé. Cela lui valut en 1906 l'exclusion de ses travaux des *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. On lui reprochait notamment de défendre le concept de génération spontanée, théorie abandonnée depuis les expériences de Pasteur.

La génération spontanée revêtait pourtant chez Leduc un sens assez différent, se rapprochant plutôt de l'abiogenèse, l'apparition «originelle» de la vie à partir de matière inanimée: «On ne peut admettre que [la chaîne de la vie] soit cassée en quelque point, c'est-à-dire qu'il y ait un lien manquant entre la nature animée et inanimée. C'est pourquoi la théorie de l'évolution admet nécessairement la nature physicochimique de la vie et la génération spontanée», écrit-il dans *The Mechanism of Life*. On lui reprochait aussi de s'appuyer sur de simples ressemblances de forme entre des systèmes par ailleurs très différents.

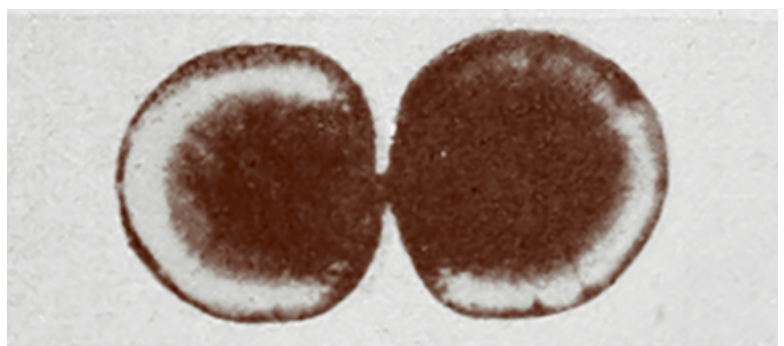
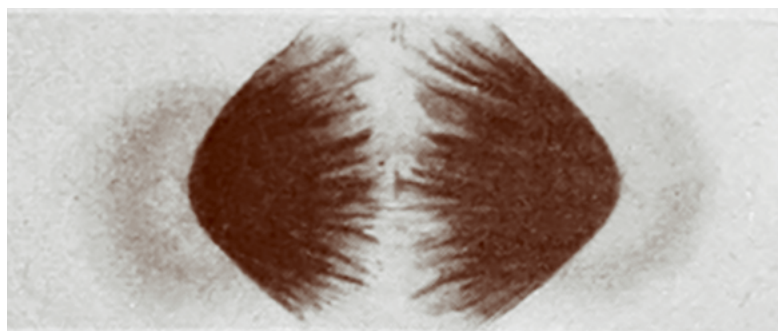
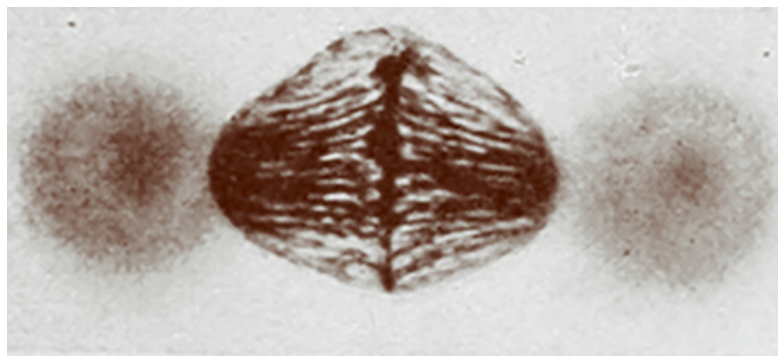
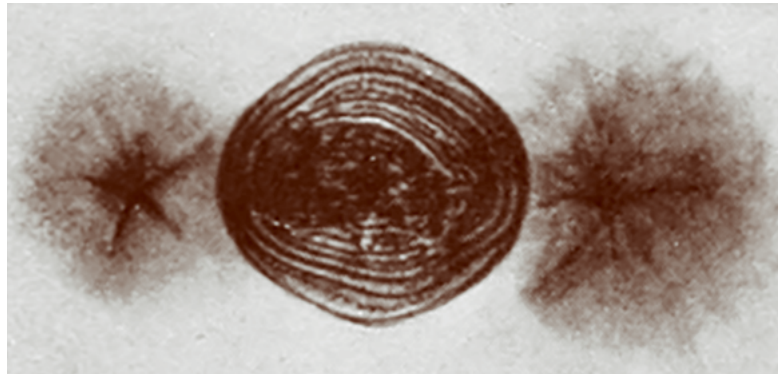
Enfin, Leduc ne cachait pas son admiration pour les grands incompris de la science, tels Galilée ou Giordano Bruno, et il ne fait guère de doute qu'il se considérait comme l'un d'eux. Cette posture, associée à un dédain non dissimulé pour le «mysticisme» de certains collègues, a probablement contribué à marginaliser son travail. Et malgré une influence certaine pendant ses années d'activité et une visibilité internationale notable pour l'époque – le biologiste écossais D'Arcy Thompson le cite à plusieurs reprises dans son ouvrage *On Growth and Form* (1917), où il va même un peu plus loin que Leduc en proposant des mécanismes physiques à l'origine des ressemblances entre, par exemple, cellules et bulles de savon –, le travail de Leduc est largement tombé dans l'oubli durant le xx^e siècle, *a fortiori* après l'avènement de la génétique.

En effet, dans le courant du siècle, la génétique a transformé les sciences de la vie et

LA DIVISION CELLULAIRE: UNE HISTOIRE DE DIFFUSION

Stéphane Leduc reproduisit la division d'une cellule et de son noyau par la seule force de la diffusion de liquides. Le noyau était

présenté par une goutte d'eau salée colorée avec un peu d'encre de Chine, posée sur une couche d'eau salée (le cytoplasme). De part et d'autre du noyau, il ajouta une goutte de la même solution plus concentrée, légèrement colorée. Aussitôt, les microparticules d'encre se disposèrent en un long ruban enroulé, qui peu à peu se divisa en deux faisceaux convergeant vers les gouttes plus concentrées, à l'instar des fuseaux observés lors de la division cellulaire.



Des mécanismes physiques interviennent dans des étapes clés de l'embryogenèse

Cet article est initialement paru dans le magazine *Reflets de la physique* : R. Clément, « Stéphane Leduc et la physique du vivant », n° 58, pp. 26-29, juin 2018.

BIBLIOGRAPHIE

R. Clément, **Stéphane Leduc and the vital exception in the Life Sciences**, arXiv, article 1512.03660, 2015.

S. Tirard, **La biologie synthétique : de Stéphane Leduc à Craig Venter... Le retour ?**, *Cahiers François Viète*, série II, vol. 6-7, pp. 137-150, 2012.

J. J. Kupiec et P. Sonigo, **Ni Dieu ni gène. Pour une autre théorie de l'hérédité**, Seuil, 2003.

E. Fox Keller, **Making Sense of Life**, Harvard University Press, 2003.

S. Leduc, **Théorie physico-chimique de la vie et générations spontanées**, A. Poinat, 1910.

biaisée par la spécificité du vivant. Cette révolution se dessine enfin aujourd'hui. Ces dernières années, la biologie a connu une explosion de l'utilisation de concepts issus de différents domaines de la physique comme la physique statistique, la mécanique ou l'étude des systèmes complexes.

LE RENOUVEAU DE LA PHYSIQUE DU VIVANT

En biologie du développement, l'utilisation de modèles physiques ou mécaniques pour comprendre l'émergence macroscopique de formes à partir de comportements cellulaires est devenue courante, pas seulement dans les revues de biologie théorique ou de biophysique, mais aussi dans les revues classiques de biologie ou les revues généralistes, y compris les plus prestigieuses. Des mécanismes physiques interviennent ainsi dans des étapes clés de l'embryogenèse des vertébrés comme la gastrulation (l'apparition dans l'embryon, à un stade où il ressemble à une boule de cellules, de feuillettes qui se spécialisent) et la formation du plan d'organisation, qui définit par exemple où pousseront les membres. Et la physique explique aussi en partie la phyllotaxie, la disposition des feuilles sur la tige des plantes. Leduc, en affirmant que le problème de la biologie devait être de comprendre «le jeu des forces physiques sur la matière vivante», et en mettant en lumière les considérables «facultés d'organisation» des forces physiques ordinaires, préfigurait cette évolution.

L'héritage de Stéphane Leduc ne se limite donc pas à ses expériences osmotiques parfois naïves, mais englobe son approche théorique très novatrice des questions d'organisation en biologie. Si certaines de ses idées semblent maintenant datées ou simplistes, comme l'a par exemple souligné en 2002 l'historienne Evelyn Fox Keller dans son livre *Making Sense of Life*, il a pourtant introduit l'idée remarquable, et des preuves de principe expérimentales, que les forces physiques ordinaires ont une «faculté d'organisation» largement sous-estimée jusqu'à très récemment en biologie, préfigurant ainsi le concept moderne d'autoorganisation. Comment alors expliquer que ses contributions aient été si largement oubliées?

Certes, il a pu manquer à son travail expérimental, qui repose essentiellement sur des analogies de forme, un support théorique plus solide. Mais son éviction témoigne aussi de la réticence à adopter en biologie une démarche non spécifique au vivant. Pourtant, de plus en plus de travaux montrent aujourd'hui comment les principes physiques hérités de Leduc ou de D'Arcy Thompson peuvent aider à appréhender les mécanismes d'organisation de la matière vivante, apportant ainsi leur pierre à la grande quête des mécanismes de l'épigenèse. ■

R

ENDEZ-VOUS

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

LE POTENTIEL D'ANGER DES INTELLIGENCES SURHUMAINES

Entre l'idée de superintelligences menaçantes et celle, plus sympathique, de machines qui ne seraient que notre prolongement, laquelle est la plus vraisemblable ?

MATHEMATIQUES



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

Un exploit étonnant vient d'être réalisé dans le domaine des recherches en intelligence artificielle (IA). Le programme AlphaZero, conçu et programmé par David Silver et son équipe de la société DeepMind, apprend seul, en jouant contre lui-même, ce jeu combinatoire que sont les échecs, à jouer aux échecs, au go ou au shogi (échecs japonais). Il a dépassé le niveau des meilleurs joueurs humains dans ces trois jeux.

L'exploit est un formidable progrès : l'ordinateur Deep Blue, qui a battu en 1997 le champion du monde d'échecs Gary Kasparov, combinait de bons algorithmes et une connaissance experte des ouvertures de jeu, des fins de partie et de l'évaluation des configurations, ces expertises provenant des meilleurs joueurs humains qui avaient en quelque sorte « instruit le programme ».

Avec AlphaZero, plus besoin d'experts humains transmettant un savoir patiemment acquis ; pour ce type de jeux, l'IA travaille seule et obtient mieux que ce à quoi aboutissent des siècles de concentration humaine. Les chercheurs qui ont mis au point AlphaZero précisent : « Nous avons appliqué AlphaZero aux jeux d'échecs, de shogi, ainsi qu'au go, en utilisant le même algorithme et la même architecture réseau pour les trois jeux. Nos résultats démontrent qu'un algorithme polyvalent d'apprentissage par renforcement [l'algorithme favorise les choix qu'il fait quand il gagne] peut apprendre, *tabula rasa*, sans connaissances ni données humaines spécifiques. »

A mesure que l'intelligence artificielle progresse, des questions de plus en plus pressantes sont formulées à son sujet. Certains chercheurs et philosophes qualifiés parfois de technoprophètes nourrissent le débat et proposent des visions du futur, variées et contradictoires. Qu'on s'en réjouisse ou qu'on le craigne, nul ne doute que les machines intelligentes, peut-être mises en réseaux ou fusionnées aux humains, façonneront notre avenir.

Parmi ces penseurs qui tentent de déchiffrer le futur, citons Nick Bostrom, Ray Kurzweil, Ben et Ted Goertzel, Hans Moravec, Francis Heylighen, Hugo de Garis, et Clément Vidal. Tous réfléchissent à ce que pourrait être une intelligence artificielle supérieure et à son attitude face à l'humanité.

EXCÈS D'HONNEUR ET INDIGNITÉ

Comme souvent quand on comprend mal un sujet, on procède par excès et, selon son tempérament, on voit exclusivement le verre à moitié vide ou le verre à moitié plein. Pour reprendre les mots que Racine met dans la bouche d'un de ses personnages, l'IA ne mérite cependant ni l'excès d'honneur qu'on lui accorde ni l'indignité liée à la crainte qu'elle suscite.

L'étonnement face aux succès obtenus et la prise de conscience des impacts que cela aura ne doivent pas faire perdre le sens de la mesure. L'IA réussit magnifiquement dans de nombreuses tâches spécialisées, mais reste encore démunie pour tout ce qui demande du sens commun, comme la traduction automatique.



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



1

ALPHAZERO APPREND TOUT SEUL

Aujourd'hui, les programmes de jeu d'échecs pour téléphones sont bien plus forts que Deep Blue, la machine qui, en 1997, a battu Gary Kasparov, alors champion du monde. Plus aucun espoir n'existe que des humains puissent reprendre le dessus sur les machines. C'est vrai aussi pour le jeu de go, pour lequel il a fallu toutefois attendre 2015 avant d'avoir des programmes dépassant les meilleurs joueurs.

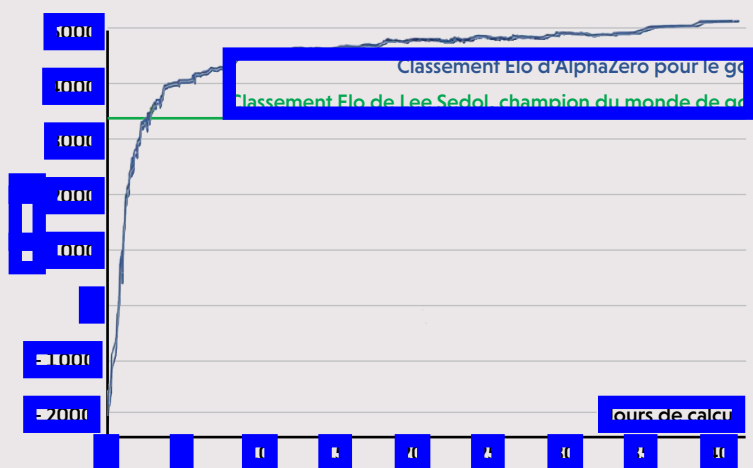
Les progrès de l'intelligence artificielle concernant ces jeux ne s'arrêtent pas là. Le programme AlphaZero, contrairement à Deep Blue et bien d'autres programmes, n'a pas besoin d'utiliser l'expertise humaine. Partant seulement des règles du jeu pour les échecs, le go et le shogi, le programme joue contre lui-même. Au départ, il joue au hasard, mais en prenant en compte les résultats des parties jouées, il apprend et se perfectionne petit à petit en utilisant un mécanisme d'apprentissage construit sur un réseau de neurones formels. Au bout d'une période de quelques heures dans le cas des échecs et du shogi, et de quelques jours pour le go, le programme atteint un niveau de jeu dépassant celui des meilleurs joueurs humains et aussi celui des meilleurs programmes. Gary Kasparov a examiné la façon dont joue le programme

d'échecs résultant de ce processus d'apprentissage par renforcement et a fait quelques commentaires intéressants :

« Contrairement aux programmes traditionnels tels que Stockfish et Fritz, qui utilisent des fonctions d'évaluation prédéfinies par des humains, ainsi que d'énormes bibliothèques d'ouvertures et de fin de partie, AlphaZero commence en ne connaissant que les règles du jeu d'échecs, sans la moindre stratégie humaine associée. En quelques heures, il joue plus de parties contre lui-même qu'on en a mémorisées dans l'histoire des échecs humains. Il apprend seul les meilleures façons de jouer, en particulier en réévaluant les pièces du jeu. Il est devenu assez puissant pour battre les meilleurs joueurs mondiaux d'échecs. Il a par exemple obtenu 28 victoires, 72 nuls et aucune défaite contre Stockfish. Je dois dire que j'ai été ravi de voir qu'AlphaZero avait un style dynamique et ouvert comme le mien. On pense en général que les machines jouent bien en choisissant des coups techniques, conduisant le plus souvent à des parties nulles. J'ai observé à l'inverse qu'AlphaZero donne la priorité à la dynamique des pièces plutôt qu'aux pièces elles-mêmes, préférant des positions qui, à mes yeux, semblaient

risquées et agressives. Les programmes s'efforcent généralement les priorités et les préférences des programmes humains, mais dans le cas d'AlphaZero, qui n'est victime d'aucun préjugé, je crois que son style correspond simplement à la réalité profonde du jeu. Sa compréhension supérieure lui permet de surclasser le meilleur programme du monde et cela bien qu'il opère le calcul d'un nombre beaucoup moins important de positions par seconde. Il illustre l'adage classique : « Travaillez intelligemment, plutôt que beaucoup. »

Ainsi, AlphaZero joue E65 dans la position de sa partie contre Stockfish (ce qu'aucun joueur humain ni aucun programme classique ne trouvent) et gagne. Pour une discussion du coup, voir <https://youtu.be/thZzaS-noSo>. Nous avons également appris lors de son match contre Stockfish qu'AlphaZero préférerait avoir les blancs : sur les 28 victoires d'AlphaZero, 25 ont été remportées avec les pièces blanches. La machine a également compilé à fréquence à laquelle elle a utilisé les différentes ouvertures mises au point depuis des siècles par les humains, et qu'elle a retrouvées ! L'ouverture du gambit dame est finalement sa favorite



2

ANTICIPATIONS SINGULIÈRES

Peter Diamandis est l'un des fondateurs de l'Université de la Singularité (<https://singularity.com/>), une organisation californienne d'inspiration transhumaniste. Il a récemment interrogé divers spécialistes à propos de ce qui se passerait dans les vingt prochaines années. Il a effectué la synthèse des réponses (voir <https://www.diamandis.com/blog/countdown-to-the-singularity>). Voici quelques-unes de ces anticipations. Précisons qu'elles ne font pas l'unanimité et qu'elles semblent plutôt optimistes.

En 2020, des systèmes de diagnostic utilisant l'IA et proposant des recommandations seront utilisés dans la plupart des établissements de santé américains.

En 2020, de nouveaux catalyseurs seront découverts grâce à l'utilisation de processeurs à portes quantiques, ce qui marquera le début de la fin de la chimie traditionnelle.

En 2022, les gens pourront également voyager dans des voitures autonomes partout aux États-Unis. [Si cette prédiction signifie que des voitures parfaitement autonomes existeront en 2022, elle est en contradiction avec l'avis d'autres experts, qui ne les pensent pas possibles avant une cinquantaine d'années.]

En 2024, des missions humaines privées auront été lancées avec comme objectif la surface de Mars.

En 2024, les premiers contrats « un centime par kilowattheure » pour l'énergie solaire et éolienne seront signés. [Aujourd'hui, les meilleurs prix dans le monde pour un kilowattheure d'électricité sont de l'ordre de 5 centimes, très rarement 2 centimes, et cela résulte d'une surproduction locale d'énergie électrique qui, sinon, serait achetée. En France, le kilowattheure est vendu autour de 15 centimes.]

En 2030, l'IA réussira à passer le test de Turing, ce qui signifie qu'elle pourra égaler et dépasser l'intelligence humaine dans tous les domaines. [Là encore, cette prédiction semble particulièrement optimiste.]

En 2034, les robots agiront comme des domestiques, des majordomes, des infirmières et des nourrices et deviendront des compagnons à part entière. Ils rendront possible une autonomie prolongée des personnes âgées chez elles.

En 2036, des traitements de longévité seront disponibles et pris en charge par les assurances de santé, prolongeant ainsi la durée de la vie moyenne de 30 à 40 ans.

Les œuvres littéraires. La conduite automatisée des véhicules a récemment donné lieu à beaucoup de rêves, alors que les spécialistes annoncent prudemment qu'on ne fera de voitures totalement autonomes, où vous vous asseyez à l'arrière et lisez votre journal, que dans cinquante ans au mieux (voir S. Shladover, « La voiture en quête d'autonomie », *Pour la Science* n°466, août 2016).

Dans un article de cette rubrique, je mentionnais aussi les méthodes conduisant à flouer les réseaux de neurones profonds destinés à la classification d'images, ce qui conduit à ce qu'ils croient reconnaître une autruche quand on leur présente une photo où tout humain voit clairement un camion (*Pour la Science* n°488, juin 2018).

Aujourd'hui, ce domaine de recherche qui n'a pas une définition et une délimitation précises, réussit magnifiquement dans des tâches spécialisées de plus en plus nombreuses, mais rencontre deux obstacles principaux. D'une part, l'IA obtient ses résultats sans procéder comme le font les humains pour les mêmes tâches, mais en s'aidant de dispositifs techniques et de calculs dont se passent les humains : radars et lasers pour les voitures partiellement autonomes, capacités colossales de calculs et de mémorisation qui n'ont rien d'équivalent dans les cerveaux humains. D'autre part, les succès obtenus ne se combinent pas, et l'IA ne sait pas aujourd'hui former des systèmes cohérents associant les capacités spécialisées maîtrisées pour constituer des êtres autonomes doués de sens commun et dont on puisse raisonnablement soutenir qu'ils ont conscience d'eux-mêmes, possèdent une forme de sensibilité, de l'humour et des personnalités structurées et robustes.

ANNONCES PRÉMATURÉES
ET SINGULARITÉ

En 1958, Herbert Simon, qui a reçu en 1978 le prix d'économie en mémoire d'Alfred Nobel, annonçait que l'ordinateur battrait le champion humain aux échecs dans les dix années à venir. Il avait raison sur la possibilité d'un tel exploit, mais pas sur la durée d'attente : il a fallu quarante ans pour que sa prédiction se réalise.

En 1966, Irving Good, statisticien reconnu, qui conseilla Stanley Kubrick pour son film *2001, l'Odyssée de l'espace*, annonçait l'avènement vers l'an 2000 d'une superintelligence artificielle au moins équivalente à l'intelligence humaine. Elle n'est pas encore là et ceux qui prévoient sa venue ont reculé l'échéance. Raymond Kurzweil, aujourd'hui directeur de l'ingénierie chez Google, et Peter Diamandis, cofondateur et président de la Singularity University (une société privée californienne), évoquent 2030, alors que Ted et Ben Goertzel,



chercheurs en IA, pensent plutôt qu'il faudra attendre 2040, voire 2100.

Il se pourrait que l'on se trouve dans une situation analogue à celle du jeu d'échecs: on y arrivera, mais pas dans les délais annoncés, car le problème est réellement difficile, ce que l'on découvre année après année. Le plus raisonnable serait sans doute de ne pas tenter aujourd'hui de pronostics!

Liée à cette éventuelle superintelligence artificielle, l'idée d'une «singularité» à venir est évoquée sans qu'on puisse savoir vraiment de quoi il s'agit. Une date où se situerait une sorte d'asymptote verticale dans la courbe mesurant le niveau des intelligences artificielles créées sur Terre? Un point où les machines écrasent les humains prendraient le pouvoir? Un instant au-delà duquel il est impossible de comprendre ce qui va se passer à cause des bouleversements entraînés par l'existence d'intelligences artificielles nous dépassant?

Tout cela n'est pas très sérieux, même en prenant en compte la célèbre «loi de Moore» (vérifiée en gros depuis cinquante ans) qui indique un doublement de capacité des dispositifs informatiques tous les dix-huit mois ou deux ans. D'une part, une fonction exponentielle comme celle envisagée par la loi de Moore n'a pas d'asymptote verticale. D'autre part, dans notre monde physique, toute croissance exponentielle rencontre rapidement des obstacles qui l'arrêtent et personne ne défend sérieusement que la loi de Moore (qui s'essouffle déjà) continuera à être valide indéfiniment. Dernier point: l'augmentation des capacités de calcul et de mémoire ne constitue pas la garantie qu'on saura les utiliser pour créer cette fameuse intelligence générale qui nous résiste.

Les annonces des Gafam (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft) sur ces sujets doivent être examinées avec méfiance. Certains spécialistes comme Jean-Gabriel Ganascia, président du comité d'éthique du CNRS et lui-même chercheur en intelligence artificielle, sont plus rigoureux et lucides que les agents publicitaires des firmes de technologie. Jean-Gabriel Ganascia considère que ceux-ci cherchent à promouvoir un projet du dépassement de la politique et des États-nations par les entreprises à l'avidité sans borne. L'idée de la singularité, utilisée pour amuser et effrayer, aurait en réalité surtout pour but d'intimider et de masquer leurs ambitions dominatrices.

Les difficultés à anticiper avec précision n'interdisent pas de s'adonner au jeu de l'anticipation en s'interrogeant sur l'apparition d'une superintelligence artificielle, quitte pour cela à imaginer plusieurs scénarios, sans donner d'échéances et en envisageant qu'éventuellement aucun ne se réalise. Jouons.

Nick Bostrom définit dans son livre une superintelligence comme tout intellect qui

excède radicalement les capacités cognitives humaines et ce dans tous les domaines. Deux hypothèses assez différentes sont envisagées.

(a) Les machines à base de silicium, y compris les ordinateurs quantiques s'ils se révèlent utiles, progressent au point que les dispositifs construits nous égalent et nous dépassent dans toutes les tâches intellectuelles possibles, cela, comme pour AlphaZero, sans que nous soyons associés directement à leur fonctionnement et sans que des éléments biologiques aient été fusionnés ou connectés à ces créatures intelligentes artificielles.

(b) Seule une association entre des éléments (humains ou non) provenant de la biologie et des dispositifs informatiques, donc un mixte de technologies inventées par l'homme et de parties utilisant ce que la vie sur Terre a soigneusement élaboré, réussit ce dépassement.

ARTILECTS OU CYBORGS

Les êtres intelligents provenant de l'hypothèse (a) sont dénommés *artilects* (pour *artificial intellect*) par Hugo de Garis, un chercheur qui a développé un scénario pour le futur sur lequel nous allons revenir.

La science-fiction a envisagé l'hypothèse (b) depuis longtemps et dénommé *cyborgs* (pour *cybernetic organisms*) ces êtres hybrides superintelligents grâce au mélange et à l'imbrication de biologie et d'informatique. Imaginons par exemple que, pour suppléer à notre mémoire insuffisante, on nous greffe des puces contenant des téraoctets de données qui nous permettraient directement par la pensée de savoir tout ce qu'il y a dans l'encyclopédie Wikipédia, et que grâce à un module de calcul mathématique lui aussi accessible instantanément par la pensée, nous sachions répondre à n'importe quelle question du type «Combien fait 7^{20} ?» ou «Quelle est la dérivée cinquième de $\sin(\cos(x))$?» Notre intelligence en serait accrue!

Une troisième hypothèse est parfois évoquée, celle d'un cerveau planétaire naissant des réseaux de machines qui s'échangent des informations et constituent une sorte d'être décentralisé et pensant: nous y reviendrons.

LE PESSIMISME DE HUGO DE GARIS

Pour Hugo de Garis, «la société se divisera en trois groupes philosophiques majeurs, progressivement opposés. Le premier groupe sera constitué par les *cosmistes* (terme dérivé du mot *cosmos*), favorables à la construction d'artilects. Le deuxième groupe sera constitué des *terrans* (dérivé du mot *Terra*, la Terre), opposés à la construction d'artilects. Le troisième groupe sera celui des *cyborgistes*, qui souhaitent devenir eux-mêmes des artilects en ajoutant des composants à leur propre cerveau humain.»



3

LE TRANSHUMANISME

Nick Bostrom, philosophe suédois et cofondateur de la World Transhumanist Association, pense que

l'homme doit tenter de se transformer physiquement et ne voit pas de limite à cette ambition : « Nous ne sommes pas contraints d'accepter ce que la nature a fixé, nous ne sommes par exemple pas obligés d'accepter de mourir après quelques décennies sur Terre. Nous ne sommes pas plus obligés d'accepter des limites dans nos capacités mentales. La vie meilleure envisagée par les transhumanistes consiste en plus du contrôle sur notre propre vie, et en la possibilité de rester totalement maître de nos idéaux. Évidemment, ces idéaux, dans un monde posthumaniste, varieraient d'un individu à l'autre. Les transhumanistes veulent que chacun puisse faire ses propres choix. Le sens à donner à l'idée d'une vie meilleure sera une affaire personnelle. Dans le monde idéal du transhumanisme, la mort serait volontaire. Si vous pensez que vous avez assez vécu, que vous avez apporté au monde ce que vous aviez à y apporter, que vous avez atteint vos objectifs et qu'il n'y a plus de raison de vivre, vous arrêterez de prendre des suppléments de vie ou d'utiliser toute autre technique pour perdurer. En revanche, si vous croyez qu'il serait peut-être bon de vivre encore et de voir ce que la vie peut vous apporter, vous en auriez encore la possibilité. Dans un monde développé technologiquement, nous serons toujours confrontés à des défis variés supérieurs à ceux d'aujourd'hui. Prenons le cas des mathématiques. Vous pouvez faire facilement certains calculs qui étaient

autrefois inconcevables : vous n'avez qu'à pianoter sur votre calculatrice. Cette nouvelle situation n'a pas aboli les défis mathématiques, elle a, au contraire, ouvert la voie à des défis plus intéressants et plus nombreux. »

Le transhumanisme est souvent critiqué, voire considéré comme scandaleux. Une déclaration du Vatican intitulée « Communion et service : la personne humaine créée à l'image de Dieu » affirme ainsi : « Changer l'identité génétique de l'homme en tant que personne humaine par la production d'un être infrahumain est radicalement immoral. Le recours à la modification génétique pour produire un surhomme ou un être doté de facultés spirituelles essentiellement nouvelles est impensable, puisque le principe de la vie spirituelle de l'homme (le principe qui informe la matière pour en faire le corps d'une personne humaine) n'est pas produit par des mains humaines et n'est pas sujet à la manipulation génétique. L'unicité de chaque personne humaine, en partie constituée par ses caractéristiques biogénétiques et développée par l'alimentation et la croissance, lui appartient intrinsèquement et ne peut pas être instrumentalisée dans le but d'améliorer certaines de ses caractéristiques. [...] L'homme est créé à l'image de Dieu mais il n'est pas Dieu. »

Les idées des transhumanistes s'opposent aussi à celles de Hugo de Garis qui ne croit pas que l'homme augmenté des transhumanistes puisse rester compétitif face aux machines superintelligentes qui extermineraient les êtres humains et les cyborgs.

Dans son livre *The Artillect War*, ouvrage intermédiaire entre science-fiction et essai sérieux de futurologie, Hugo de Garis considère inévitable une guerre entre ces groupes. Pour lui, elle sera plus sanglante encore que toutes celles ayant eu lieu sur Terre et provoquera au cours du *xxi^e* siècle des hécatombes de plusieurs milliards de morts. Cette guerre a peu de chance de s'achever en faveur des terrans qui, s'ils veulent gagner, doivent agir rapidement avant que les deux autres groupes, capables de s'associer, comprennent qu'ils sont menacés par les terrans. Dans un entretien diffusé sur Discovery Channel, Hugo de Garis a exprimé son inquiétude : « Je suis content d'être en vie maintenant. Je mourrai sans doute paisiblement dans mon lit. Cependant, je crains vraiment pour mes petits-enfants. Ils seront mêlés à la guerre d'Artillect et seront probablement détruits par elle. »

Assez curieusement, les transhumanistes, peu appréciés en France, où la très grande majorité des articles et livres qui les mentionnent le font pour les condamner ou s'en moquer, défendent des idées bien optimistes comparées à cette guerre annoncée par Hugo de Garis. Les transhumanistes soutiennent l'idée qu'il faut aller, sans retenue, vers l'augmentation et le perfectionnement technique des humains et non seulement porter des lunettes, des prothèses auditives ou des *pacemakers*, mais utiliser tout ce qu'on pourra pour allonger nos vies, renforcer nos capacités intellectuelles et physiques. En clair, ils sont favorables à l'idée des cyborgs, et seraient donc dans le camp cyborgiste tentant de s'associer aux cosmistes pour éviter d'être préventivement éliminés par les terrans.

Concernant ce qui pourrait se passer entre cyborgistes et cosmistes, les avis des transhumanistes et de Hugo de Garis divergent. La plupart des transhumanistes envisagent la possibilité d'une coexistence entre les cyborgs en partie humains et les machines devenues superintelligentes sans composants biologiques. Les transhumanistes croient que le fait d'associer des éléments vivants (eux en particuliers) et la technologie électronique permettrait de maintenir dans la compétition les humains augmentés qui, peut-être devenus immortels, resteraient la clé du futur de l'humanité.

Hugo de Garis défend le contraire : à côté des capacités que pourraient acquérir les artillects, le projet transhumaniste ne fait pas le poids. Pour lui, la voie du mélange du vivant avec le futur des technologies informatiques est une illusion : les artillects n'auront que faire des hybrides monstrueux qui seraient devenus les humains modifiés et s'en débarrasseront.

Nick Bostrom, cofondateur de la World Transhumanist Association, n'est pas persuadé

que les artefacts adopteront une attitude pacifique envers leurs créateurs humains éventuellement devenus cyborgs. Il nous incite à surveiller nos créations intelligentes futures qu'il voit comme des menaces. L'ouvrage de Nick Bostrom a été lu par Elon Musk, Bill Gates et Robin Li (du géant chinois Baidu) et semble les avoir ébranlés, ce qui les a amenés à répandre un message de crainte et des mises en garde à propos de nos futures IA.

Pour Hugo de Garis, il n'y aura pas d'intelligence artificielle amicale tolérante aux humains ou même aux cyborgs: «L'idée d'une queue qui remue le chien est évidemment ridicule. Un chien est beaucoup plus gros que sa queue, donc la queue ne peut pas remuer le chien. C'est pourtant ce que proposent les transhumanistes: les artefacts (esprits artificiels, machines massivement intelligentes) resteraient amicaux avec les humains. [...] Je trouve cette conception arrogante et naïve. Elle suppose que les êtres humains sont suffisamment intelligents pour anticiper les motivations d'une créature disposant de capacités des milliards de milliards de fois supérieure à celles humaines.»

AUTRES SCENARIOS, AUTRES ARGUMENTS

La position de Hugo de Garis semble aveugle à un mouvement qui enlèverait tout sens à l'idée de guerre exterminatrice: la construction d'un superorganisme mondial associant et liant tous les êtres qui, à la surface du globe, ne seraient pas en concurrence, mais associés.

Cette idée d'une unité à l'échelle globale est en général considérée comme religieuse. Elle est présente dans la philosophie bouddhiste et chez le philosophe jésuite Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), qui a évoqué une convergence vers la «noosphère», une «pellicule de pensée enveloppant la Terre, formée des communications humaines».

Le philosophe belge Francis Heylighen défend l'idée que la superintelligence sera distribuée à travers le réseau Internet, qui fonctionnera comme un supercerveau: «Ce cerveau mondial relèvera tous les défis auxquels est confronté le superorganisme mondial. Ses capacités iront bien au-delà de nos capacités actuelles. Il possédera les attributs divins: omniscience (il saura tout ce qu'il faut pour résoudre nos problèmes), omniprésence (il sera présent partout, à tout moment), omnipotence (il pourra produire n'importe quelle chose ou service de la manière la plus efficace) et omnibienveillant (il visera le plus grand bonheur pour le plus grand nombre).» L'exact opposé du pessimisme de Hugo de Garis!

Clément Vidal, philosophe, spécialiste de cosmologie à la Vrije Universiteit de Bruxelles.

appelle la phrase du poète William Stafford que «toute guerre fait deux perdants» et que la violence est le plus souvent irrationnelle. Steven Pinker détaille cette pacification du monde qui, même si on la trouve bien trop lente, se mesure et s'explique. D'une part, l'interdépendance de tous vis-à-vis de tous nous le veut, qu'on le veuille ou non. Des arguments de théorie des jeux et des simulations informatiques sur la base du modèle du dilemme des prisonniers s'ajoutent à cette analyse des faits. Ils montrent que la coopération est l'issue rationnelle de nombreuses configurations sociales et politiques.

CONVERGENCE DES RITES

L'éthique de la complexité (voir cette rubrique dans Pour la Science de septembre 2018) est un dernier argument montrant qu'une convergence des motivations aboutissant à une unification des intérêts de tous sur Terre n'est pas absurde. Si tous les êtres intelligents choisissent de servir un ensemble de valeurs universelles communes comme cette éthique l'envisage, alors ils agiront avec des objectifs partagés et les raisons de mener des guerres cesseront d'opérer.

Bien sûr, quoique convergents, ces divers arguments ne constituent pas une preuve définitive que lorsque des superintelligences existeront sur Terre (si cela se produit), alors elles formeront avec nous les humains, devenus plus ou moins cyborgs, un tout pacifié sans qu'aucune partie ne tente d'en éliminer l'autre. Il me semble cependant que l'on peut défendre l'idée très simple que l'humanité n'est pas simplement l'addition des corps biologiques présents sur Terre, mais l'ensemble de tout ce qu'elle a produit et même de tout ce qui lui permet d'y vivre. Ce corps collectif qu'est la Terre évoluant vers plus d'intelligence et des liens de plus en plus resserrés et unis, en particulier par les multiples réseaux récemment déployés à la surface du globe, ne déclenchera probablement jamais cette guerre interne imaginée par Hugo de Garis, qui serait une forme d'automutilation voire de suicide.

Nous sommes là maintenant au-delà de la science-fiction; cependant, prenons garde de ne pas condamner toute réflexion sur ces questions en les considérant comme stupides et prématurées. AlphaZero nous montre que ce que nous arrivons à tirer de nos machines est incroyable: l'intelligence artificielle cesse progressivement d'être un rêve. Par ailleurs, le développement des réseaux de toutes sortes tisse un cocon dense de liens entre tous les acteurs présents dans le monde. Sans le moindre doute, il se construit une structure nouvelle où tout dépend de tout et dont nous ne sommes, comme nos machines intelligentes, que des composants. ■

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, La singularité technologique, consulté en décembre 2018.

D. Silver et al., A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play, Science vol. 362, pp. 1140-1144. 2018.

J.-G. Ganascia, Le Mythe de la singularité, Seuil. 2017.

N. Bostrom, Superintelligence, Dunod. 2017.

S. Pinker, La Part d'ange en nous. Les Arènes. 2017.

J. et T. Goertzel (dir.), The End of the Beginning: Life, Society and Economy on the Brink of the Singularity, Humanit+ Press. 2015.

H. de Garis, The Artefact War - Cosmists vs. Terrans, ETC Publications. 2005.



Mycelium chair, du studio Klarenbeek & Dros, est une chaise en mycélium de champignon qui a poussé autour de déchets agricoles.

AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

ALANGUI SUR UN CHAMPIGNON

Les chaises en plastique, en bois, en métal... sont dépassées, car ces matériaux ne sont ni écologiques ni renouvelables. Et si vous essayiez plutôt les chaises en champignon?

D

ans *Alice au pays des merveilles*, de Lewis Carroll, l'héroïne rencontre une chenille affalée sur un champignon où

elle fume tranquillement une longue pipe turque. Et si vous en faisiez autant? Non pas fumer, mais vous installer confortablement sur un champignon? C'est l'étonnante proposition du studio Klarenbeek & Dros, installé à Zaandam, aux Pays-Bas. Ils présentent leur *Mycelium chair* («chaise mycélium») à l'occasion de l'exposition «La Fabrique du vivant», au Centre Pompidou, à Paris.

Dans le cadre de la troisième édition du cycle «Mutations/Créations» qui réunit artistes, chercheurs, scientifiques..., cette manifestation explore la place du vivant et de la vie artificielle dans la création artistique. Que peut-on y voir? Des matériaux de construction, où croissent des mousses, des lichens...; des lampes où des microalgues purifient l'air ou bien alimentées par des bactéries bioluminescentes; des vases composés de cellules cancéreuses; des textiles biocomposites constitués de molécules du vivant (chitosane, pectine, cellulose...). Dans

es œuvres présentées, entre art et design, les champignons ont une place à part, notamment dans *Mycelium chair*...

Comme son nom l'indique (le mycélium est l'ensemble des filaments souterrains des champignons), cette chaise est construite à base de champignons. De fait, les équipes d'Eric Klarenbeek et Maartje Dros ont mis au point en 2011 une technique d'impression 3D en mycélium (aujourd'hui portée par la start-up Crown).

Des moules confectionnés en un biopolymère renouvelable sont remplis avec un mélange de déchets agricoles (de la biomasse), d'un peu d'eau et du mycélium qui, au bout d'environ une semaine de développement, confère à l'ensemble sa rigidité. Une fois séchée, la pièce est stable, et le matériau entièrement renouvelable: pour s'en débarrasser, lorsque vous changez votre intérieur, il suffit de le réduire en petits morceaux prêts à être compostés.

Le champignon utilisé est le ganoderme luisant (*Ganoderma lucidum*), plus connu sous son nom japonais Reishi et paré de nombreuses vertus médicinales. Et il se prête désormais à la fabrication de toute sorte d'objets: tables, lampes, pots de fleurs, carrelages.

Le mycélium de champignons est aussi le matériau choisi par David Benjamin, du studio new-yorkais The Living, pour concevoir des briques qui croissent et s'assemblent naturellement en une structure architecturale.

Les champignons, mais aussi les algues marines, les bactéries, les levures sont devenus des matériaux dont s'emparent aujourd'hui les artistes, les designers et les architectes. Ils remplacent le bois, le plastique, le béton, le métal. L'idée de matière est bouleversée. Les œuvres conçues à partir d'organismes biologiques, voire directement à l'aide de processus biologiques, se situent à mi-chemin entre l'inerte et le vivant. Et elles ont un énorme avantage: elles sont durables et biodégradables. Une petite révolution sans doute.

Au passage, la création s'enrichit de nouveaux moyens de s'exprimer, nourris par les sciences du vivant, les neurosciences, la biologie de synthèse. Les objets qui nous entoureront auront en eux une parcelle de vie, un peu comme le mobilier de la Bête, dans *La Belle et la Bête*. Osez-vous encore vous asseoir sur une chaise vivante, quand bien même en champignon?

Sinon, essayez la *Crystallized Chair*, de Tokujin Yoshioka, également présentée. Une structure en forme de chaise, plongée dans une solution, s'est progressivement hérissée de cristaux acérés...

«La Fabrique du vivant», jusqu'au 15 avril 2019, au Centre Pompidou, à Paris.
<http://bit.ly/CGM-LEDV>



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

AUTEURS

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

ROULER SANS ÊTRE SECOUÉ

Assurer une bonne tenue de route et le confort des passagers : tel est le rôle des suspensions et amortisseurs dans une voiture. Des suspensions dont les fréquences d'oscillation doivent éviter celles qui sont propres au corps humain.

Les routes ne sont pas parfaitement planes. Lorsque les revêtements sont dégradés, les creux et bosses de la chaussée provoquent un mouvement vertical des roues, qui se transmet à la caisse du véhicule et aux passagers. Les conséquences sont multiples : risque de perte de contact entre la roue et le sol, donc d'une mauvaise tenue de route, usure de la structure et des équipements, inconfort des passagers. Pour éviter ces désagréments, la suspension du véhicule joue un rôle essentiel. Mais comment choisir ses caractéristiques ?

DES SUSPENSIONS.

L'analyse des mouvements de la caisse d'un véhicule et de sa tenue de route peut vite devenir complexe. Nous allons donc nous restreindre aux mouvements verticaux d'une automobile roulant en ligne droite. Jouons les naïfs et

imaginons un véhicule sans suspension, c'est-à-dire avec des essieux liés rigidement au châssis.

Tant que la route est plate, pas de soucis. Mais qu'une irrégularité se présente, et la roue subit une accélération verticale. En effet, les pneus, bien que légèrement compressibles, ne peuvent épouser la déformation et transmettent à la caisse, par exemple lors de la montée d'une bosse, une accélération verticale, donc une vitesse verticale.

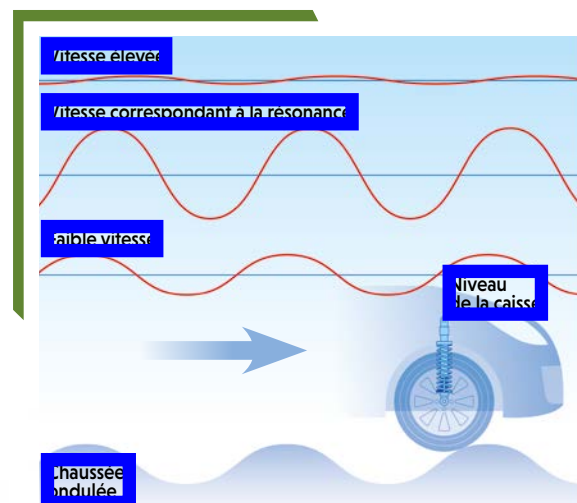
Considérons un tel véhicule se déplaçant à 36 kilomètres par heure, soit 10 mètres par seconde, et qui passe sur un ralentisseur. Lorsque les roues avant roulent sur la pente montante, que l'on suppose inclinée de 10%, elles sont animées d'une vitesse vers le haut de 1 mètre par seconde. Après que le train avant a dépassé le sommet de la bosse, les roues avant perdent le contact avec le sol, donc l'adhérence, et la voiture décolle : malgré



Les roues des véhicules sont équipées d'une suspension (un ressort et d'un amortisseur, afin d'atténuer les effets des irrégularités de la chaussée).

la gravité, elle conserve une vitesse ascendante pendant 0,2 seconde et aura donc parcouru au moins 2 mètres avant de retomber.

Pour éviter cela, il faut empêcher que le mouvement vertical des roues soit transmis instantanément et totalement à la caisse, afin que celle-ci reste horizontale malgré la bosse. Cela implique une suspension compressible : c'est le rôle des ressorts hélicoïdaux de suspension, bien visibles sur la plupart des voitures. Dans leur régime habituel de fonctionnement, leur variation de longueur (étirement ou compression) est proportionnelle à la force subie à leurs extrémités. L'inverse



ONDULATIONS

Le mouvement vertical de la caisse d'un véhicule dont les roues sont équipées d'une suspension est en fait un mouvement de résonance.

La chaussée ondulée dépend de sa vitesse. À faible vitesse, la caisse suit la déformation de la chaussée. À vitesse élevée, l'amplitude du mouvement est faible. À vitesse moyenne, où la fréquence des bosses rencontrées est voisine de la fréquence propre d'oscillation des suspensions (situation de résonance), le mouvement est légèrement amplifié. Un déphasage est également à noter, sauf à faible vitesse.

de la constante de proportionnalité est la «raideur»: plus cette caractéristique du ressort est élevée, plus la déformation est faible pour une force donnée.

Surgit alors une nouvelle difficulté. Une masse m (la caisse) posée sur des ressorts (la suspension) oscille verticalement dès qu'on lui donne une impulsion. La fréquence de ces oscillations, appelée fréquence propre, ne dépend pas de l'amplitude du mouvement: elle est proportionnelle à la racine carrée de k/m , où k désigne la raideur du ressort. Ainsi, lors du passage d'un ralentisseur, les ressorts se compriment, ce qui réduit fortement le mouvement de la caisse du véhicule

vers le haut, mais au prix d'un nouvel inconvénient: une fois le ralentisseur franchi, la caisse de la voiture se met à osciller verticalement!

.. QUI OSCILLENT PARFOIS INCONFORTABLEMENT

Et ce n'est pas tout, car les routes sont toujours quelque peu ondulées. En pratique, on tolère des ondulations d'amplitude comprise entre 2 et 20 millimètres pour des distances crête-crête allant de 1 à 50 mètres. Ce qui, avec des vitesses variant entre 1 et 35 mètres par seconde, engendre des fréquences de vibration comprises entre 0.02 et 35 hertz (Hz).

Si la voiture roule lentement, la fréquence des oscillations verticales imposées par la chaussée est plus faible que la fréquence propre d'oscillation du véhicule. Celui-ci suit alors le mouvement vertical des roues, mais, comme ce mouvement est lent, ce n'est pas vraiment un problème.

Si la voiture roule vite, les oscillations sont plus rapides que la fréquence propre:

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



lans ce cas, la caisse bouge à peine selon la verticale et la suspension joue parfaitement son rôle.

Mais si la fréquence des oscillations est proche de la fréquence propre du véhicule, il y a résonance: les ondulations de la chaussée sont amplifiées, et la caisse bouge verticalement avec des amplitudes bien supérieures aux irrégularités de la chaussée!

DES AMORTISSEURS ADEQUATS

Que faire? D'abord, limiter fortement les oscillations libres de notre système masse-ressort. C'est le rôle des amortisseurs, ces dispositifs encastrés selon l'axe des ressorts de suspension. Encore faut-il convenablement régler l'amortissement: trop faible, il n'empêchera pas de nombreux rebonds; trop élevé, il n'y aura plus de rebond, mais le temps de retour à l'équilibre sera très long, ce qui nuira au confort des passagers si les irrégularités se succèdent à un rythme plus élevé.

On choisit ainsi le coefficient d'amortissement pour que le système de suspension-amortissement soit à peu près dans son régime «critique», où les rebonds ont tout juste disparu et où le retour à l'équilibre est le plus rapide (pour un amortissement donné, le régime critique dépend de la fréquence propre, donc de la masse du véhicule et de sa charge). Un autre avantage de ce choix est que l'amplification du mouvement, quand la fréquence excitatrice atteint une fréquence de résonance, proche de la fréquence propre du système non amorti, est peu marquée.

Reste une question épineuse. Comment choisir la raideur des ressorts de la suspension? On devine qu'ils doivent être mous pour le confort, mais pas trop mous pour limiter l'amplitude du mouvement de la suspension, c'est-à-dire son débattement. Au-delà de ce minimum à respecter, c'est en fait le confort des passagers qui va déterminer la raideur des ressorts, de telle façon que la fréquence de résonance de l'oscillateur caisse-suspension ait la valeur la moins gênante pour le corps humain.

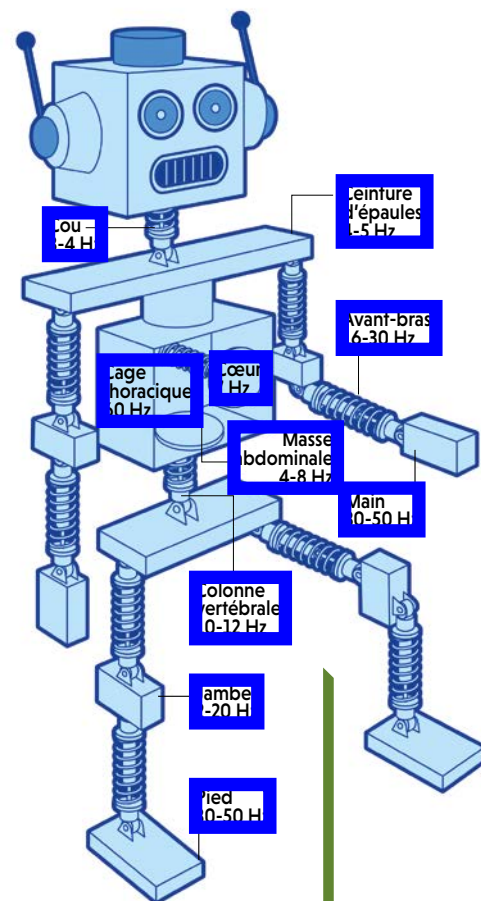
Il faut tout d'abord éviter le mal des transports, qui apparaît lorsque notre oreille interne est sollicitée à des fréquences inférieures à 1 Hz. De façon plus générale, le corps humain est très sensible aux vibrations de fréquences inférieures à 20 Hz, précisément les fréquences qu'il subit dans une voiture.

L'étude biomécanique est délicate, mais il est possible de modéliser les différentes parties du corps comme des ensembles masse-ressort amortis et de

LE CORPS ASSIMILE À DES MASSES ET DES RESSORTS

Sur le plan biomécanique

On peut modéliser le corps humain de façon simplifiée comme un assemblage de masses reliées par des ressorts amortis, comme représenté ci-contre. Cela s'applique aux membres comme aux principaux organes internes. Chacun de ces systèmes masse-ressort se caractérise par une fréquence propre d'oscillation, qui détermine son comportement lors des oscillations imposées de l'extérieur. La conception des suspensions d'un véhicule doit en tenir compte. En particulier, il faut éviter que le véhicule oscille à des fréquences qui soient trop proches des fréquences propres des parties du corps humain, ce qui donnerait lieu à une amplification par effet de résonance. Les suspensions sont, de ce fait, conçues pour que leur fréquence de résonance soit voisine de 1 hertz.



déterminer les fréquences propres de ces oscillateurs (voir l'encadré ci-dessus).

Outre les vibrations de la tête, de la colonne vertébrale ou des membres, cette analyse révèle que nos organes internes peuvent aussi bouger par rapport au reste du corps. Et si nous sommes agités à un rythme proche de leurs fréquences propres (environ 7 Hz pour le cœur, entre 4 et 8 Hz pour le foie, entre 6 et 12 Hz pour les reins...), des troubles et des douleurs variés peuvent s'ensuivre.

REGLER LA FREQUENCE PROPRE SUR ENVIRON 1 HERTZ

La conclusion est que la sensibilité de l'organisme humain aux vibrations verticales est minimale aux environs de 1 Hz. C'est cette fréquence qui nous permet de dimensionner les suspensions: avec une masse de 1 tonne, donc 250 kilogrammes par roue, on trouve des raideurs de 10 kilonewtons par mètre et un temps de relaxation (retour à l'équilibre) de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. Des chiffres similaires aux valeurs réelles, malgré la simplicité et les limites de notre approche, qui omet les vibrations des pneus ou des sièges et qui suppose des suspensions purement passives...

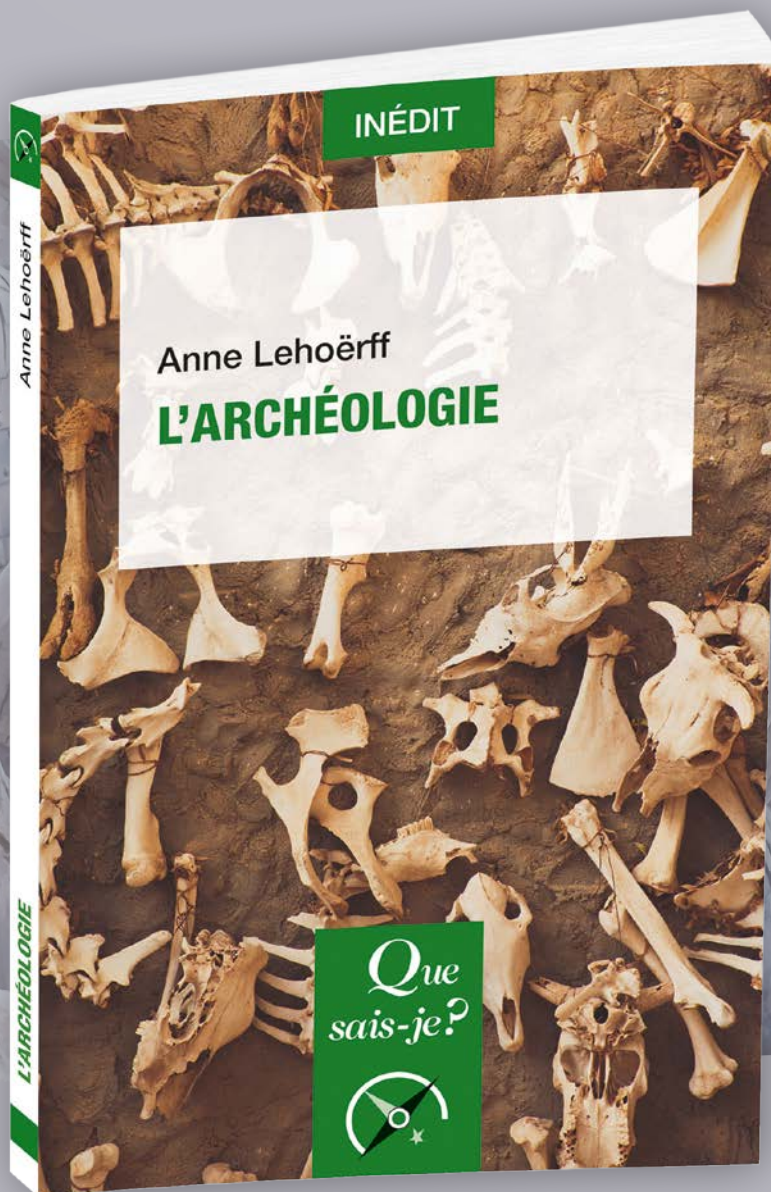
BIBLIOGRAPHIE

A. Letevely, *Etude de l'influence des suspensions de véhicule de tourisme sur le confort vibratoire, le comportement routier et les limites de fonctionnement*, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, 2014
www.theses.fr/2014BORD0346/document

C. Fritsch, *Fun with automobile springs*, *The Physics Teacher*, vol. 44(7), pp. 451-454, 2006

A. G. Piersol et T. L. Paez, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, chapitre 42: « Effects of shock and vibration on humans », McGraw-Hill, 6^e édition, 2009.

ENQUÊTES, FOUILLES, DÉCOUVERTES...



EN LIBRAIRIE

*Que
sais-je?*

AUTEUR



HERVE LE GUYADER
Professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université à Paris

LA ROSE DÉVOILE SON GÉNOME

Pourquoi la rose fleurit-elle continûment? D'où lui viennent ses nombreux pétales? Où est-elle apparue? L'étude de son génome fournit des réponses...

La rose est l'une des fleurs les plus cultivées du monde. On compte plus de 3000 cultivars (variétés cultivées) de rosiers, variant par de nombreux caractères de la fleur, bien sûr : couleur, parfum, nombre de pétales...

sonnante, avec ou sans épines... La passionnante histoire des rosiers compte trois périodes bien distinctes : celle, paléontologique, des rosiers sauvages ; celle des premières introductions en Europe, lors des grands voyages de découverte ; enfin, celle des nombreuses hybridations des roséristes.

Toutefois, le chemin qui a conduit aux roses que nous connaissons gardait encore récemment de nombreuses parts d'ombre. Aujourd'hui, cependant, la phylogénie et la génomique s'entendent pour décoder l'origine géographique de la rose et son expansion dans l'hémisphère Nord, et pour retracer l'histoire de sa domestication. On découvre notamment la part génétique de certaines de ses qualités reconnues, comme son parfum, sa floraison ininterrompue et l'abondance de ses pétales.

Il a tout d'abord fallu classer toutes les espèces connues. Cette opération était si compliquée qu'au XIX^e siècle les botanistes ont proposé de les regrouper en une dizaine de sections, que le

botaniste allemand Volker Wissemann, alors à l'université d'Iéna, a réévaluées en 2005. Or, grâce à une collaboration entre l'université de Montréal et l'institut de biologie de Chengdu, dans le Sichuan, en Chine, une équipe a publié en 2015 une phylogénie qui remet un ordre précis dans ces sections et parvient à résumer la biogéographie de la rose.

PLUSIEURS FOIS VENUE D'ASIE

Les plus anciens fossiles connus, datant de la première période de l'Éocène, l'Yprésien (il y a entre 55,8 et 48,6 millions d'années), ont été trouvés dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord (Idaho) et en Chine, près de Fushun, non loin de la frontière avec la Corée du Nord. Il apparaît que les rosiers américains et chinois ont continuellement échangé des gènes, le détroit de Béring n'étant pas encore ouvert. Il y a 30 millions d'années, les plantes asiatiques de la section *Synstalea* ont gagné l'Europe, puis l'ouest de l'Amérique du Nord. Pourtant, sur le continent américain, la plupart des espèces modernes appartiennent à la section *Cinnamomeae* et sont le résultat d'une récente recolonisation, il y a environ 13 millions d'années, à partir de l'Asie, toujours par le pont de Béring. De même, des espèces de cette dernière section ont recolonisé l'Europe et l'Afrique pendant



Ses épines sont des poils qui se sont spécialisés à la suite de l'expression d'un gène particulier. Plus ce gène est exprimé, plus les épines sont abondantes.

EN CHIFFRES

200

Le genre *Rosa* qui rassemble les roses, compte environ 200 espèces.

2 000 ans

Cela fait plus de 2 000 ans que l'on cultive des roses. Des représentations de ces fleurs décoraient déjà des poteries asiatiques il y a 5 000 ans.

100

Les roses dites doubles ont plus de 40 pétales, alors qu'une rose simple n'en a que 5. Certaines roses doubles ont jusqu'à 100 pétales. Les roses semi-doubles, comme *Rosa chinensis*, comptent entre 8 et 40 pétales.



L'analyse du génome de *Rosa chinensis* a révélé un lien étroit entre la biosynthèse des pigments colorés des pétales et celle des parfums de la fleur.

Hormis la couleur des pétales, cette variété de *Rosa chinensis*, aussi nommée rose du Bengale, ressemble beaucoup à la variété Old Blush, dont les pétales sont roses.



Rosa chinensis var. *sempertloren*
taille du rosier : jusqu'à 2 m. de haut

À la seconde moitié du Miocène, il y a entre 6 et 6 millions d'années.

Ces échanges ont favorisé la polyploïdisation – l'augmentation du nombre de lots de chromosomes dans le génome, lors d'une hybridation par exemple. C'est pourquoi, lorsque, tout récemment, des botanistes ont voulu séquencer un génome, ils ont choisi une rose moderne diploïde, non polyploïde, c'est-à-dire comportant le même nombre de chromosomes qu'une rose sauvage. Son génome n'est pas trop grand, mais doit quand même comporter des traces des hybridations passées.

Leur choix s'est arrêté sur le cultivar *Rosa chinensis* Old Blush, de la section *Chinenses*, connu des horticulteurs sous les noms de Parsons, Pink China ou Old Blush China. Ce choix paraît bien judicieux, car ce cultivar semble être le premier arrivé d'Asie en Europe au XVIII^e siècle; il a été répertorié en Hollande en 1752, puis en Grande-Bretagne en 1793. Surtout, il a été très utilisé par la suite pour développer les variétés modernes de roses, car il possédait une caractéristique que les roses européennes n'avaient pas : une floraison continue. Il est considéré comme l'un des principaux cultivars qui, au fil des croisements successifs avec des roses européennes, méditerranéennes et du Moyen-Orient, ont conduit aux roses modernes.

Deux groupes internationaux ont réalisé son séquençage, l'un piloté par Mohammed Bendahmane, de l'École normale supérieure de Lyon, l'autre par Fabrice Foucher, de l'Institut de recherche en horticulture et semences, à Angers. Les deux séquençages (chacun de plus de 90 % du génome) proposent indépendamment un génome de même taille: 516 et 512 millions de paires de bases (les constituants de l'ADN), pour respectivement 36 000 et 39 000 gènes codant des protéines. Comparé au génome humain, celui de la rose est sept fois plus petit, mais compte presque deux fois plus de gènes!

Comment étudier l'histoire de la domestication? Le groupe de Mohammed Bendahmane a comparé le génome de la rose chinoise à 15 autres génomes de roses des sections *Chinenses*, *Cinnamomeae* et *Synstalae*, qu'il a séquencés de nouveau pour l'occasion. Et il a recherché quelle était la contribution de chaque section dans le génome de la première rose moderne, le cultivar La France. Créée accidentellement au XIX^e siècle dans les serres lyonnaises du rosieriste Jean-Baptiste Guillot, cette rose est remontrante comme les rosiers européens et a une floraison abondante de fleurs doubles comme les rosiers de Chine.

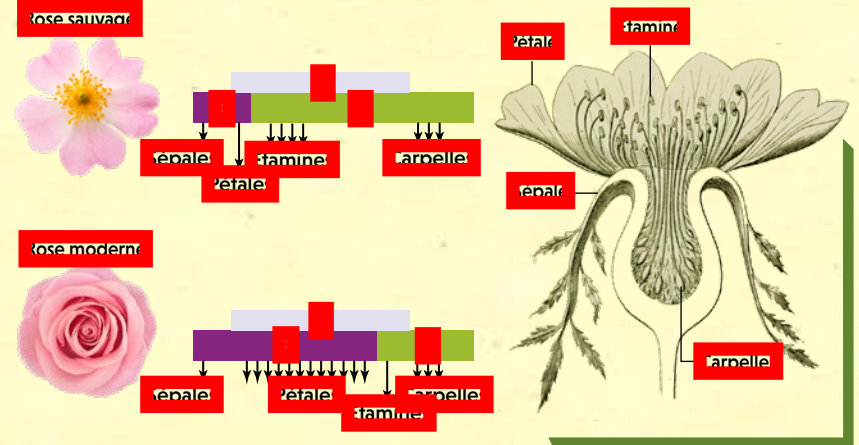
FLORAISON CONTINUE: UNE HISTOIRE DE TRANSPOSONS

Botaniquement, le cultivar La France est un hybride entre un hybride remontrant Madame Victor Verdier et un rosier à odeur de thé, lui aussi hybride. Et de fait, son génome s'est révélé une mosaïque complexe de fragments provenant des trois sections *Chinenses*, *Cinnamomeae*, *Synstalae*, brassés par les diverses hybridations. Or les biologistes de l'évolution savent que l'hybridation provoque souvent un déséquilibre génétique. Le stress ainsi induit favorise la mobilisation de fragments mobiles d'ADN – des transposons – qui s'insèrent de manière aléatoire dans le génome et sont susceptibles de provoquer des bouleversements quand ils atteignent des séquences codantes ou régulatrices.

Recherchant de tels éléments mobiles, l'équipe de Lyon a ainsi, entre autres, mis au jour le mécanisme qui maintient une floraison continue. Elle a montré qu'un transposon a muté le gène *TFL1* (*Terminal Flower 1*), dont le produit, en temps normal, maintient le méristème apical, la zone de croissance de la partie aérienne de la plante, dans un état

COMMENT LA ROSE A MULTIPLIÉ SES PÉTALES

En botanique, le modèle ABC décrit comment l'expression d'un ensemble de trois gènes A, B, C suffit à orchestrer la croissance d'une fleur. Chez la rose sauvage, qui n'a qu'une rangée de pétales, la seule expression du gène A détermine l'expression des carpelles, puis celle des étamines. Enfin, la seule expression du gène C donne les carpelles, qui renferment les ovules de la fleur. Le gène A inhibe le gène C et ainsi détermine la frontière à partir de laquelle les étamines se forment. Dans le modèle ABC de la fleur double, l'expression du gène C est très faible, car son territoire est envahi par l'expression du gène A. La nouvelle frontière se trouve décalée, et ainsi on obtient des pétales là où l'on attend des étamines. Chez la rose moderne, cette dérégulation serait due à l'insertion d'un élément mobile dans le gène *RC3G0243000*, qui joue le rôle du gène A.



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

BIBLIOGRAPHIE

D. Raymond et al., *The Rosa genome provides new insights into the domestication of modern roses*, *Nat. Genet.*, vol. 50, pp. 772-777, 2018.

J. Hilbrand Saint-Oyant et al., *A high-quality genome sequence of Rosa chinensis to elucidate ornamental traits*, *Nat. Plants*, vol. 4, pp. 473-484, 2018.

A. Bombarely, *Roses for Darwin*, *Nat. Plants*, vol. 4, pp. 406-407, 2018.

M. Fougère-Danezan et al., *Phylogeny and biogeography of wild roses with specific attention to polyploids*, *Ann. Bot.*, vol. 115, pp. 275-291, 2015.

indéterminé (floral ou végétatif). Après mutation, le méristème reste continuellement floral.

Le groupe de Fabien Foucher a, lui, analysé le gène *RC3G0243000*, un homologue du gène *APETALA2*, décrit par ailleurs chez d'autres fleurs et qui joue un rôle essentiel dans la détermination de l'identité des pièces florales (sépal, pétale, étamine, pistil) durant l'embryogenèse de la fleur (voir l'encadré ci-dessus). Or dans une région non codante du gène (un intron), on détecte aussi l'insertion d'un transposon. Il est vraisemblable que cet accident génomique ait entraîné, par le changement de régulation de l'expression du gène, le phénotype «fleur double», caractérisé par de très nombreux pétales.

Ainsi, sans le savoir, les rosieristes ont utilisé un mécanisme clé de l'évolution – la mobilisation des transposons – lors des hybridations qu'ils ont produites. Et ces transposons ne sont qu'un exemple des mécanismes évolutifs mis au jour dans la domestication de la rose. On le voit, il est tout aussi instructif d'étudier le résultat d'une sélection artificielle que naturelle pour détailler et comprendre les mécanismes moléculaires et cellulaires impliqués dans l'évolution... ■

**DURÉE
LIBRE**

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

☒

DUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique

1

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

☐

FORMULE DÉCOUVERTE
12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %
DPV4E90

☐

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

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

2

Mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Tél. :
E-mail :@.....
(indispensable pour la formule intégrale)
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science
☐ OUI ☐ NON

3

Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :
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
(à conserver pour le dossier de l'abonné)

4

Merci de joindre impérativement à votre bulletin

Formulaire de réduction
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 l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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 (UE) 2016/679 dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupement 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

Autre réserve au service abonnement - Non inscrit

MAÎTRE



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

LA COULEUR DES LIMONADES

Une limonade qui contient de la pulpe de citron s'éclaircit. Pourquoi? La question intéresse l'industrie des teintures.

Nous avons des idées fausses sur la couleur des aliments... parce que nous nous contentons de les regarder naïvement. Par exemple, un blanc d'œuf battu en neige est-il vraiment blanc?

Il est blanc, tirant vers le vert, et c'est la réflexion d'une lumière blanche sur la surface des bulles qui fait apparaître blanche une telle mousse; éclairée par de la lumière bleue, la mousse est bleue. Ou encore, le jus de tomate, qui semble rouge, n'a cette couleur que temporairement, pendant le temps où les fragments de peau ou de pulpe sont en suspension dans le liquide; après sédimentation ou centrifugation, on le voit jaune, légèrement ambré.

Il est ainsi passionnant de bien regarder les aliments. Le sirop de menthe? Cuire des feuilles de menthe dans de l'eau avec du sucre fait un produit clair, qui n'a certainement pas la couleur verte que nous attendons; cela conduit l'industrie des sirops à ajouter des colorants alimentaires, en l'occurrence soit des chlorophyllines, soit un mélange de divers colorants, par exemple le caramel (E150b) et le bleu brillant (E122).

La limonade? Elle semble devoir être d'un beau jaune. Mais si l'on se contente de cuire des zestes de citron avec des feuilles de menthe, de l'eau, du sucre, puis d'ajouter le jus de citron à la décoction, on obtient une légère couleur jaune-vert. Et la couleur sera encore moins soutenue si l'on supprime la menthe de la préparation, ce qui aura toutefois l'inconvénient de réduire le goût frais apporté par les feuilles de cette plante.

Surtout, un phénomène mystérieux apparaît si l'on utilise une autre recette, qui consiste à laisser les demi-citrons pressés (la pulpe, donc, et pas seulement le zeste) entiers dans le liquide que l'on

Contrairement aux apparences publicitaires, la pulpe de citron effadit la couleur de la limonade.

prépare: la couleur disparaît, et la limonade devient incolore!

Pourquoi cette décoloration? Certains pourraient penser que l'effet s'apparente à celui observé quand on ajoute du jus de citron à du thé. Il est exact que, quand les polyphénols du thé se retrouvent dans un milieu plus acide, ils changent de couleur. Ces polyphénols s'apparentent aux pigments des fruits ou des fleurs, qui furent les premiers indicateurs colorés en chimie: par exemple, les «sirops de violette» étaient utilisés par les chimistes jusqu'au XVIII^e siècle comme indicateurs colorés.

On fera ainsi l'intéressante expérience d'ajouter de la soude caustique à des framboises bien rouges: naturellement acides, elles virent alors au vert (surtout ne pas les manger ainsi!). Et quand on réacidifie, elles reprennent leur couleur rouge initiale.

COMMENT LA PULPE AGIT-ELLE?

Mais ce phénomène n'explique pas la décoloration des limonades, car c'est le jus qui est acide, et non la pulpe. Et cette dernière ne change pas l'acidité. Alors?

Alors on n'en sait rien à ce jour, même si l'industrie alimentaire sait valoriser des résidus végétaux de la préparation des aliments industriels pour extraire des pigments utiles pour décolorer. D'ailleurs, l'industrie textile est également concernée, et elle s'est intéressée à l'utilisation

de billes de cellulose, ou à des résidus de l'extraction des betteraves ou des cannes à sucre.

L'hypothèse d'une fixation des matières colorantes de la limonade par la pulpe de citron devra toutefois tenir compte de la présence de l'acide citrique, abondant dans la boisson: l'industrie des teintures découvre qu'ajouter ce composé au bain de teinture des cotons (de la cellulose presque pure, très semblable chimiquement à la pulpe des citrons) permet d'obtenir en une étape la coloration et la fixation des couleurs. ■



RECETTE D'UNE BOISSON D'HIVER

- 1 Dans une casserole, mettre un litre d'eau froide et le zeste de trois citrons.
- 2 Porter à ébullition, jeter l'eau.
- 3 Puis ajouter un litre d'eau froide, porter à ébullition et jeter l'eau de nouveau.
- 4 Aux zestes «blanchis», ajouter le jus des trois citrons, un litre d'eau, 200 grammes de sucre, une cuillerée à café d'acide citrique et quelques feuilles de menthe, un tour de moulin de poivre blanc ou un peu de piment.
- 5 Donner un coup de mixeur pour dissoudre le sucre et broyer les zestes.
- 6 Stocker dans des bouteilles. Pour servir, mettre du sirop dans un verre, quelques glaçons et, au dernier moment, ajouter une pincée de bicarbonate de sodium, qui fera une délicate effervescence.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 497 (mar. 19)
réf. PI.497



N° 496 (févr. 19)
réf. PI.496



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

A retourner accompagné de votre règlement à :

Boutique Pour la Science - Service V.P.C. - 19 rue de l'Industrie - B290055 - 67412 Illkirch Cedex - email: boutiquepourlascience@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, 9	€
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 A REGLER _____ €

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 - Sarl au capital de 32000 € - RCS Paris B.311.797.393 - Siret: 311.797.393.000.23 - APE 5814

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutiquepourlascience.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 e-mail 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 NUMÉROS SUR

BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr



BIOCHAR

Cette forme de charbon, qui sert d'amendement aux sols, s'obtient en chauffant dans des fours spéciaux, en l'absence d'oxygène, de la biomasse. C'est un moyen d'éviter des émissions de dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre, qu'entraîne la décomposition de la biomasse. Selon certaines estimations, la production de biochar permettrait de stocker dans les sols jusqu'à 2 milliards de tonnes de CO₂ par an.



LITHIUM

Les batteries Li-ion des voitures électriques utilisent un électrolyte liquide à ions lithium. Des batteries «four solide» à électrolyte métallique et à électrodes en lithium seraient 30 % plus performantes.



« L'IA réussit magnifiquement dans de nombreuses tâches spécialisées, mais reste encore démunie pour tout ce qui demande du sens commun »

JEAN-PAUL DELAHAYE



20 cm

Dans l'expérience Gbar, au Cern, on lâchera en chute libre des atomes d'antihydrogène sur 20 centimètres de hauteur pour voir s'ils tombent exactement comme des atomes d'hydrogène.



422 000 000

C'est le nombre de personnes dans le monde qui étaient atteintes de diabète en 2014. Des chercheurs viennent de montrer qu'il est possible de reprogrammer des cellules du pancréas pour qu'elles produisent de l'insuline à la place de celles qui ont été détruites. Un espoir pour les quelque 10 % des malades qui souffrent du diabète de type 1 ?



OLD BLUSH

La rose *Rosa chinensis* Old Blush semble être la première variété de rose cultivée arrivée d'Asie en Europe au XVIII^e siècle. Elle a été très utilisée par la suite pour développer les variétés modernes, car elle avait une caractéristique dont les roses européennes étaient dépourvues : une floraison continue.



1 HERTZ

On ajuste les suspensions des voitures de façon que leur fréquence propre d'oscillation soit d'environ 1 hertz, suffisamment loin des fréquences naturelles d'oscillation des principales parties du corps humain. Sinon, il pourrait y avoir résonance et le voyage en voiture serait très inconfortable !

Quel était le quotidien d'un individu handicapé ?



Valérie Delattre 192 pages, 10€

Était-il pris en charge
par les siens ?
Rejeté ? Soigné ?
Accompagné ?
Appareillé ?

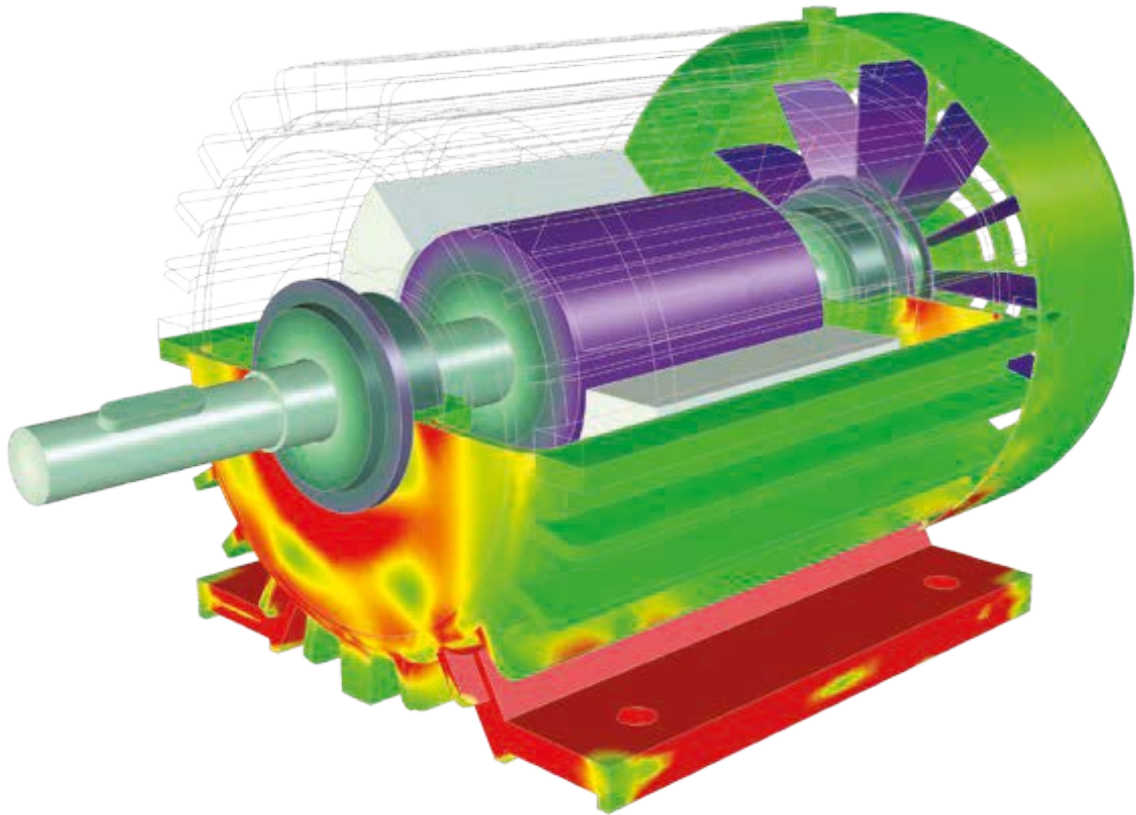
Quand l'archéologie
nous offre une
lecture de l'accueil
de la différence dans
les sociétés qui nous
ont précédé...

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site

www.editions-lepommier.fr


Le Pommier

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