



# Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Médecine

**COMMENT  
SOIGNER  
DANS L'ESPACE**

■ Physique

**LE VERRE IDÉAL,  
UN NOUVEL ÉTAT  
DE LA MATIÈRE**

■ Mathématiques

**2<sup>e</sup>: UN TERRAIN  
DE JEU  
INÉPUISABLE**

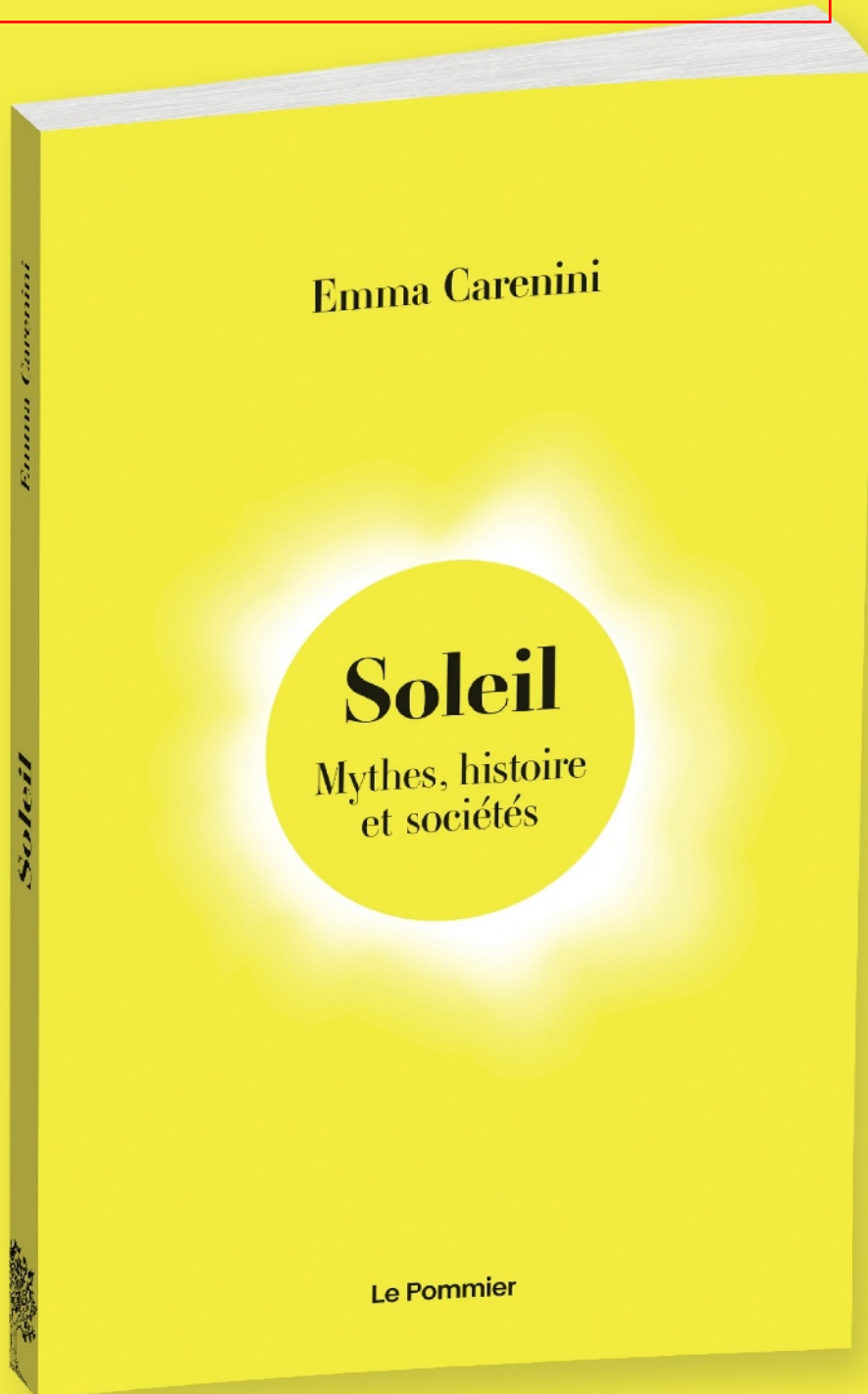
04/22

# FUSION NUCLÉAIRE

La grande accélération



# Du cadran solaire à la fusion nucléaire



En librairie





**POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef:** François Lassagne  
**Rédacteurs en chef adjoints:** Loïc Mangin,  
Marie-Neige Cordonnier  
**Rédacteurs:** François Savatier, Sean Bailly  
**Stagiaire:** Élisabeth Doré

**HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef adjoint:** Loïc Mangin

**Développement numérique:** Philippe Ribeau-Gésippe  
**Community manager et partenariats:** Aëla Keryhuel  
aela.keryhuel@pourscience.fr

**Conception graphique:** William Londiche

**Directrice artistique:** Céline Lapet

**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,  
Ingrid Leroy, Ingrid Lhande

**Révisseuse:** Anne-Rozenn Joubert

**Assistante administrative:** Doaa Mohamed

**Marketing & diffusion:** Stéphane Chobert

**Chef de produit:** Eléna Delanne

**Direction du personnel:** Olivia Le Prévost

**Secrétaire général:** Nicolas Bréon

**Fabrication:** Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

**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:**

Carine Babusiaux, Isabelle Bouchery, Maud Bruguière,  
Silvana Condemni, François-Xavier Coudert, Julie Deshayes,  
Sabrina Krief, Rosine Lallemand, Thierry Lasserre,  
Violaine Llaurens, Martin Vancoppenolle, Pascal Viel

**PUBLICITÉ France**

stephanie.julien@pourscience.fr

**ABONNEMENTS**

www.boutique.groupepourscience.fr

**Courriel:** serviceclients@groupepourscience.fr

**Tél.:** 01 86 70 01 76

Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

**Adresse postale:**

Service abonnement  
Groupe Pour la Science  
235 avenue Le Jour se Lève  
92100 Boulogne-Billancourt

**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; Alicia Abadie

Tél. 02 88 15 12 47

**Information/modification de service/réassort:**

www.direct-editeurs.fr

**www.pourscience.fr**

170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris

Tél. 01 55 42 84 00

**SCIENTIFIC AMERICAN**

**Editor in chief:** Laura Helmut

**President:** Stephen Pincock

**Executive vice president:** Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75014 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

**Taux de fibres recyclées:** 30%

«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: P<sub>tot</sub> 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**François Lassagne**  
Rédacteur en chef

# CONSTELLATION ÉNERGÉTIQUE

Elle n'est pas encore une filière industrielle, mais de nombreux réacteurs expérimentaux sont en cours de test ou en construction. Elle recèle encore bien des difficultés théoriques, mais constitue depuis des décennies un fécond domaine de recherche. Où en est la fusion nucléaire?

Quand pourra-t-on compter sur «l'énergie des étoiles», soit la production d'énergie à partir de la fusion d'atomes légers?

À en juger par les annonces des entreprises privées qui se sont engagées, ces dernières années, dans la construction de réacteurs expérimentaux, il ne manquerait plus qu'une dizaine d'années pour atteindre la maturité industrielle. Ces entreprises, bien sûr, ont intérêt à convaincre de l'imminence du succès, leurs investissements se comptant en centaines de millions de dollars.

Les organisations publiques, nationales et internationales, sont plus prudentes. Elles ont posé les fondations théoriques et technologiques de cette quête ambitieuse. Elles savent la complexité du domaine, la multitude des aléas. L'Autorité de sûreté nucléaire française a ainsi suspendu, le 25 janvier, l'assemblage de la chambre à vide du projet de réacteur expérimental international *Iter*, exigeant des précisions sur la protection radiologique des équipes, l'architecture de soutien de l'édifice et certaines soudures non conformes.

Il reste encore bien des progrès à faire. La physique des matériaux et celle des plasmas y joueront un rôle essentiel. Mais, ces dernières années, les records – de température atteinte, d'énergie extraite, de durée de fonctionnement – se sont multipliés. Et comme l'observe dans ce numéro Alain Bécoulet, directeur de l'ingénierie d'*Iter*, les deux catégories d'acteurs de la fusion nucléaire, pionniers publics et nouveaux venus portés par des entreprises privées, se font indéniablement progresser l'une et l'autre. Le développement de la fusion nucléaire se présente aujourd'hui comme une constellation, formée d'une étoile massive – *Iter* – qu'entourent une myriade de projets de conception et d'envergure variées. L'énergie des étoiles n'est pas encore domestiquée. Mais cette constellation brille suffisamment désormais pour qu'on y prête sérieusement attention. ■

# SOMMAIRE

N° 534 / Avril 2022

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- Le premier grand corps humain au Levant
- Remarquer grâce à un implant
- Le paradoxe de la glace de mer expliqué
- Un minicléoptère au vol taillé pour la vitesse
- Optimisé comme un nénuphar
- Einstein au millimètre
- Bulle galactique

P. 16

### LES LIVRES DU MOIS

P. 18

### DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Les terres à bout de souffle

Catherine Aubertin

P. 20

### LES SCIENCES À LA LOUPE

Des modèles pour prévoir et prédire

Yves Gingras

## GRANDS FORMATS



P. 38

### MÉDECINE

#### CANNABIS : QUAND LE PRESCRIRE ?

Anna Lorenzen

Le THC et le CBD, ingrédients du cannabis, deviennent disponibles dans divers pays, sur prescription médicale ou en vente libre. Mais leur usage à des fins thérapeutiques fait encore l'objet d'études, pour en déterminer les avantages et inconvénients, en particulier pour les troubles mentaux.



P. 46

### MÉDECINE

#### COMMENT SOIGNER DANS L'ESPACE

Séamus Thierry, Matthieu Komorowski, Adrianos Golemis et Laura André-Boyet

La santé des astronautes pose d'innombrables défis aux futures missions vers la Lune ou Mars, et même au développement du tourisme spatial. L'enjeu : prévenir les risques médicaux et pouvoir intervenir en cas de force majeure.



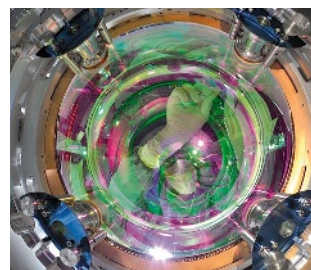
P. 56

### ZOOLOGIE

#### L'ÉVEIL DES SONS

Michael Habib

Pendant des milliards d'années, le vivant s'est tu, laissant le monopole du bruit au vent, aux vagues... Puis les animaux ont commencé à émettre des sons : les fossiles aident à retracer l'histoire du grand orchestre de la vie !



P. 64

### PHYSIQUE

#### A LA RECHERCHE DU VERRE IDÉAL

Ludovic Berthier et Camille Scalliet

Est-il encore possible d'améliorer les propriétés du verre, aux secrets de fabrication connus depuis des millénaires ? La théorie prévoit l'existence d'un « verre idéal », dont se rapprochent de nouvelles méthodes d'élaboration et de simulation.

Pour la Science.fr

LETTRÉ 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](http://www.pourlascience.fr)



#### En couverture :

© Stefan Sauer/dpa via Alamy

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, broché en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.





P.72

## HISTOIRE DES SCIENCES

### GAÏA: ENQUÊTE SUR UNE RÉVOLUTION SILENCIEUSE

Sébastien Dutreuil

Proposée dans les années 1970, l'hypothèse Gaïa, qui compare la Terre à un organisme vivant, irrigue toujours, silencieusement, les savoirs et les politiques actuelles concernant la Terre. Pourquoi une telle discrétion? Retour sur un concept controversé.



P.22

## TECHNOLOGIE

### FUSION NUCLÉAIRE: LA GRANDE ACCÉLÉRATION

Philip Ball

De nombreuses entreprises privées se lancent dans la course à la fusion nucléaire. Elles espèrent mettre au point des réacteurs commercialement exploitables au cours de la prochaine décennie.

P.32

## PHYSIQUE

### «LE DÉFI "ITER" ÉTAIT HORS NORME, MAIS NOUS TOUCHONS AU BUT»

Entretien avec Alain Bécoulet

Des résultats expérimentaux encourageants, un nombre croissant de projets de firmes privées... et «Iter»? Alain Bécoulet, en charge de l'ingénierie du projet de réacteur international, est confiant: la première fusion est prévue pour 2035.

## RENDEZ-VOUS

P.80

## LOGIQUE & CALCUL

### L'UNIVERS FABULEUX DE 2<sup>n</sup>

Jean-Paul Delahaye

En multipliant 2 par lui-même un grand nombre de fois on produit des suites de chiffres aux structures inattendues.

P.86

## ART & SCIENCE

### La supplication des punaises

Loïc Mangin



P.88

## IDÉES DE PHYSIQUE

### La roue tourne... et la fortune diminue

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

## CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

### Le fossile improbable

Hervé Le Guyader

P.96

## SCIENCE & GASTRONOMIE

### La glace à la truffe, pas facile!

Hervé This

P.98

## À PICORER

# A

## CTUALITÉS

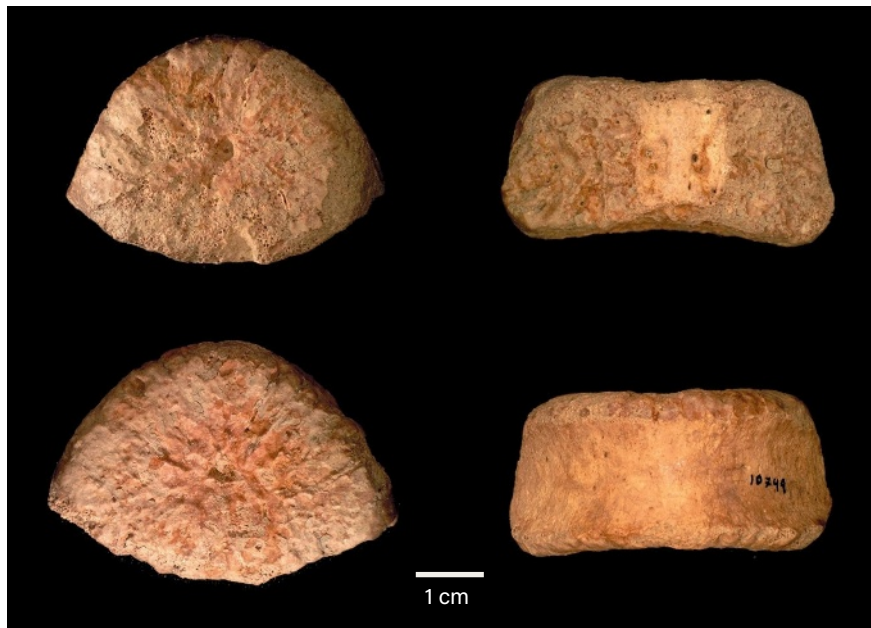
P.6 Échos des labos

P.16 Livres du mois

P.18 Disputes environnementales

P.20 Les sciences à la loupe

# LE PREMIER GRAND CORPS HUMAIN AU LEVANT



Le fragment de vertèbre d'*Homo erectus* d'Ubeidiya vu sous différents angles.

**La découverte d'une vertèbre partielle d'*Homo erectus* à Ubeidiya, en Israël, confirme que les premiers humains de grande taille se sont répandus en Eurasie après 1,5 million d'années.**

**L**e Pléistocène s'étend de 2,58 millions d'années (Ma) à 11700 ans avant le présent. Comme presque tous les fossiles humains anciens datent de cette période, on considère que cette ère géologique couvre l'évolution d'*Homo*. Elle est aussi celle pendant laquelle, à quatre reprises au moins, l'Afrique a émis vers l'Eurasie une vague humaine, son anatomie et ses outils de pierre. La première fut celle d'une petite forme humaine de type *H. habilis*. Avec Omry Barzilai, de l'Autorité des antiquités d'Israël, Alon Barash et Ella Been, de l'université de Tel Aviv, viennent de découvrir une vertèbre humaine partielle, qui date l'expansion hors d'Afrique de la deuxième vague et de la première anatomie humaine de grande taille: celle

d'*H. ergaster* (en Afrique, d'abord) et d'*H. erectus* (en Eurasie).

Pour la majorité des préhistoriens, *Homo* a émergé en Afrique il y a plus de 2 millions d'années sous des formes sans doute proches d'*H. habilis*. D'une

**La vertèbre appartenait à un individu de 6 à 12 ans qui aurait atteint adulte une taille de 1,80 mètre**

stature de 1,40 mètre, pour 35 à 45 kilogrammes, *H. habilis* avait une capacité crânienne de 550 à 700 centimètres

cubes. La cognition qui y est associée lui suffisait pour affûter des galets en aménageant une de leurs faces ou pour exploiter le tranchant des gros éclats ainsi produits dans ce que l'on nomme l'«industrie oldowayenne». *H. ergaster*, son descendant probable, est attesté en Afrique à partir de 1,9 million d'années. Il atteignait 1,70 mètre pour 50 à 65 kilogrammes. Comprise entre 550 et 1050 centimètres cubes, sa capacité crânienne a lentement augmenté alors que se perfectionnaient ses outils à tout faire. Ceux-ci, des galets et éclats aménagés sur les deux faces – les bifaces et hachereaux – et de grands éclats tranchants constituent l'«industrie acheuléenne». *H. ergaster* et son industrie se sont très tôt répandus en Eurasie méridionale, y devenant ce que les préhistoriens nomment *H. erectus*.

Mais quand exactement? C'est là que les chercheurs israéliens apportent une information cruciale.

En réétudiant les ossements animaux du site israélien d'Ubeidiya, ils ont remarqué que le fossile UB 10749, issu d'une couche datée de 1,5 million d'années, était un corps vertébral, c'est-à-dire la partie massive d'une vertèbre. Ubeidiya consiste en une série de sols d'occupation humaine de bord de lac, durcis et redressés de 70 degrés par les forces tectoniques. Outre des restes de faune, ses 60 niveaux d'occupation ont livré plus de 10000 outils acheuléens et quelques dents humaines, dont une attribuée à *H. ergaster/erectus*. Comparant UB 10749 aux corps vertébraux des gros mammifères présents à Ubeidiya, les chercheurs ont montré qu'il était homininé. Le rapport largeur/hauteur, et certains de ses autres traits prouvent par ailleurs son appartenance à la lignée humaine. Le manque d'ossification des canaux neuraux et d'autres zones indique que ce corps vertébral a appartenu à un individu prépubère de 6 à 12 ans. Paramétrées par cet âge, les équations biométriques conduisent à une taille de 1,80 mètre à l'âge adulte.

Ainsi, UB 10749 est une vertèbre partielle d'un *H. ergaster* à grand corps, mort à deux pas de l'Afrique, donc celle d'un *H. erectus*! Hors Ubeidiya, seulement huit sites eurasiens ont livré des fossiles humains datant du Pléistocène inférieur: Venta micena (Espagne, 1,4 Ma), Modjokerto (Indonésie, 1,4 Ma), Sangiran (Indonésie, 1,3 Ma), Sima del Elefante (Espagne, 1,2 Ma), Koçabaş (Anatolie, 1,2 Ma), Kozarnika (Bulgarie, 1,4 Ma) et Dmanissi (Géorgie, 1,8 Ma). À Dmanissi, c'est un type petit proche d'*H. habilis* qui est représenté, puisque les cinq crânes trouvés sur place ont tous une capacité cérébrale comparable au premier *Homo* connu. Les préhistoriens ont attribué les fossiles humains de tous les autres sites à *H. erectus*. L'ensemble de ces dates montre donc qu'après une première sortie d'Afrique de petites formes humaines avant 1,8 million d'années, une expansion hors d'Afrique d'*H. ergaster/H. erectus* a commencé vers 1,5 million d'années. Cette expansion est celle du premier type humain à grands corps, lequel deviendra dominant dans tout l'Ancien Monde et le restera jusqu'à aujourd'hui. ■

François Savatier

A. Barash et al., Sci. Rep., 2022

## Remarcher grâce à un implant

Trois personnes atteintes de lésions à la moelle épinière ont retrouvé la capacité de marcher, nager ou pédaler grâce à un implant développé par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Salif Komi, un des auteurs principaux de l'étude, répond à nos questions.



Propos recueillis par Gaia Jouanna

**SALIF KOMI**  
chercheur postdoctorant  
à l'EPFL

**Comment fonctionne l'implant que votre équipe a développé ?**

C'est un système qui se compose de plusieurs éléments. Tout d'abord, un implant flexible est placé sous les vertèbres, en contact direct avec la dure-mère, la couche protectrice de la moelle épinière, avec seize contacts électriques à l'interface. Attaché à celui-ci par des câbles, le *pacemaker*, placé sous la peau, au niveau de l'abdomen, est un petit ordinateur qui délivre sur ces seize contacts des petites impulsions électriques. Grâce à ce dispositif, nous contrôlons de nombreuses caractéristiques de ces impulsions : l'amplitude, la durée, la fréquence et aussi la combinaison des électrodes utilisées à un moment donné.

**Dans une étude parue en 2018, vous aviez déjà permis à des patients de marcher grâce à un implant. Quelle différence avec celui-ci ?**

Nous avons modifié toute l'infrastructure logicielle et technologique externe au *pacemaker*, ce qui permet de le contrôler de façon plus fine. Les implants utilisés en 2018 étaient des dispositifs commerciaux à destination d'autres prescriptions médicales, donc d'autres parties du corps, ils étaient moins spécifiques. Nous avons aussi changé les dimensions de l'implant pour l'adapter géométriquement à son emplacement au contact de la dure-mère.

De plus, en 2018, les participants au programme avaient des lésions moins sévères, des lésions incomplètes de la moelle épinière où il restait des fibres descendantes assurant des fonctions résiduelles ou le passage d'une forme d'information. Dans l'étude actuelle, les patients ont des lésions complètes.

D'autres équipes avaient déjà travaillé avec des personnes présentant des lésions complètes. Elles avaient aussi restauré la fonction de la marche. Notre dispositif conduit cependant

à un rétablissement plus rapide (en une journée d'entraînement) de fonctions motrices multiples et variées, et pas seulement limitées à la marche.

**Quelles sont les prochaines étapes ?**

Tout d'abord une amélioration technologique de la plateforme, pour faire en sorte qu'elle soit plus adaptable, par exemple, en permettant de contrôler la fréquence de chacun des seize canaux du *pacemaker* indépendamment. Pour étendre l'utilisation de ce dispositif au-delà d'un essai clinique, il faudra s'assurer que son utilisation ne nécessite pas l'intervention systématique d'un expert, que l'outil soit simple et automatique. Nous y travaillons depuis quelques années.

En 2018, nous avions montré qu'après une période de stimulation, le patient récupérait des fonctions motrices sans stimulation et de manière relativement étendue. À terme, le but serait d'avoir une technologie implantée tout de suite après la lésion (c'est la période où la possibilité de récupération est la plus grande), qui soit extrêmement facile d'utilisation et de mise en place, pour pouvoir entraîner rapidement des participants à des tâches motrices qu'ils sont incapables de réaliser sans stimulation à ce moment-là, et les faire progresser plus vite vers une récupération fonctionnelle sans stimulation.

Enfin, je pense qu'il est essentiel de ne pas oublier que la stimulation épидurale n'est pas la seule approche pour prendre en charge les problèmes de fonction motrice. Il existe d'autres pistes : des traitements chimiques, médicamenteux ou encore la régénération et les traitements fondés sur des cellules souches. À mon avis, la solution du futur sera une combinaison de ces différentes voies. Ces techniques séparées montrent des résultats intéressants, mais combinées, nous n'en savons rien pour l'instant.

A. Rowald et al., Nature Medicine, 2022



## CLIMATOLOGIE

# LE PARADOXE DE LA GLACE DE MER EXPLIQUÉ

En Antarctique, la glace de mer fait preuve d'une surprenante stabilité, contredisant les prévisions des modèles climatiques. Les tourbillons océaniques sont la clé.

**A**lors que l'étendue de glace de mer diminue progressivement d'année en année en Arctique, celle de l'Antarctique semble pour l'instant épargnée et reste stable. Elle fait mentir les simulations qui en prévoient déjà une diminution significative. À cause de ce paradoxe, le niveau de confiance accordé aux modèles climatiques dans cette région reste faible. Thomas Rackow, de l'institut Alfred-Wegener pour la recherche polaire et marine de Bremerhaven, en Allemagne, et ses collègues ont proposé une solution à ce paradoxe impliquant le niveau de résolution des modèles utilisés.

Les chercheurs ont comparé les résultats de deux modèles légèrement différents, un modèle « basse résolution » et un modèle « haute résolution ». L'une des différences entre ces deux modèles tient à la modélisation des tourbillons à une échelle dite « intermédiaire » (de l'ordre de 10 à 20 kilomètres) du courant circumpolaire : dans le modèle « basse résolution », ces tourbillons sont paramétrisés, c'est-à-dire que leur comportement physique est décrit de manière simple (il est imposé), alors que dans le modèle « haute résolution », ils sont explicitement calculés à l'aide des lois de la mécanique des fluides.

Les résultats des deux modèles, très proches en ce qui concerne l'hémisphère Nord, présentent des différences marquées autour de l'Antarctique. Même si la température de surface de l'eau y augmente dans les deux cas, elle est inférieure de 1 à 2 °C dans le modèle « haute résolution » (jusqu'à 5 °C à certains endroits en été). De plus, alors que le modèle « basse résolution » prédit un déclin marqué de la surface de glace de mer dès les années 1980 (-0,49 million de kilomètres carrés par décennie, ce qui va à l'encontre des observations mais est comparable à l'ensemble des modèles climatiques utilisés actuellement), le modèle « haute résolution » montre une stabilité de son étendue jusqu'au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, après quoi elle devrait commencer à diminuer.

Thomas Rackow et ses collègues ont comparé les différences entre les deux modèles en focalisant leur attention sur les grandes cellules de courants océaniques et en y analysant



D'après les modèles actuels, la glace de mer en Antarctique devrait reculer. Or ce n'est pas le cas. Dans des simulations prenant en compte plus finement les tourbillons océaniques, ce paradoxe est enfin compris. Dans ces nouveaux scénarios, la glace devrait régresser à partir de 2050...

## 2050

DEPUIS QUARANTE ANS, EN ARCTIQUE, LA SUPERFICIE COUVERTE PAR LA GLACE EN SEPTEMBRE, À LA FIN DE L'ÉTÉ, A DIMINUÉ. LES MODÈLES PRÉVOIENT QU'ELLE DISPARAITRA COMPLÈTEMENT EN 2050.

les différentes composantes influant sur le transport de chaleur. Des vents d'ouest, qui ont gagné en intensité (de 5 à 7 %) avec le réchauffement climatique, transportent la chaleur du pôle vers l'équateur et contribuent à refroidir l'Antarctique, tandis que les tourbillons favorisent le transport de chaleur vers le Sud, ce qui réchauffe l'Antarctique. Dans le modèle « haute résolution », l'influence des tourbillons semble s'intensifier moins vite que l'influence des vents : l'équilibre penche donc en faveur du transport océanique de chaleur vers le Nord qui ralentit le réchauffement de l'océan Austral autour de l'Antarctique. Ainsi, la circulation océanique observée dans le modèle « haute résolution » semble décrire plus fidèlement la dynamique dans cette partie du globe. Des travaux ultérieurs permettront de confirmer ce résultat, un enjeu majeur, sachant que les courants océaniques jouent un rôle central dans le cycle du carbone et la répartition globale de l'énergie. ■

Nicolas Butor

T. Rackow et al., *Nature Communications*, 2022

## ENCORE PLUS LÉGERS!

**D**epuis 1998, les physiciens ont la certitude que les neutrinos ont une masse non nulle mais que celle-ci est infime. Il restait à préciser sa valeur, un défi expérimental difficile. Dans l'expérience *Katrin*, les chercheurs étudient le tritium, un isotope instable de l'hydrogène qui se désintègre en un atome d'hélium-3, avec émission d'un électron et d'un neutrino. Plus l'électron a une énergie élevée, plus celle du neutrino est faible et, au minimum, son énergie correspond à sa masse. Ainsi, en analysant avec minutie le spectre en énergie des électrons, il est possible de fixer une limite supérieure sur la masse des neutrinos. Résultat : leur masse est inférieure à 0,8 électronvolt, moins d'un milliardième de celle du proton. ■

Sean Bailly

La collaboration *Katrin*, *Nature Physics*, 2022

## ÉTHOLOGIE

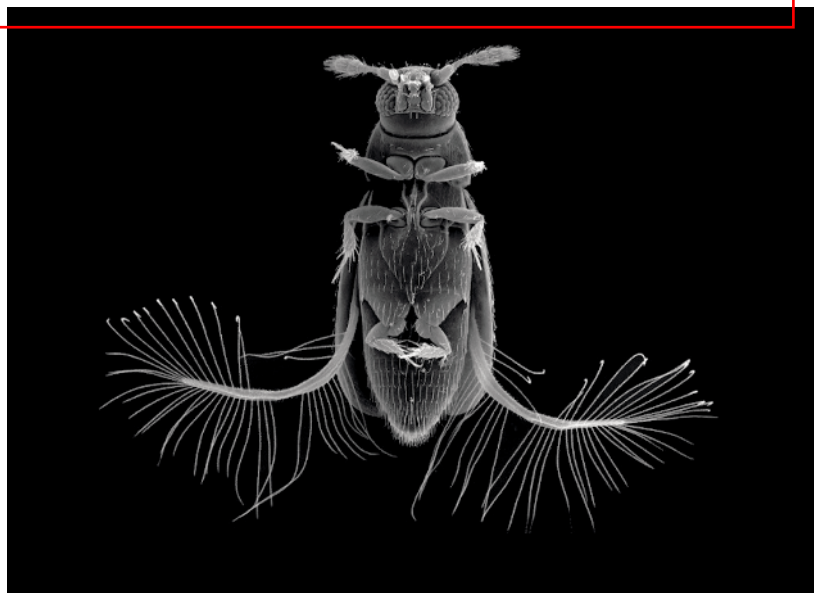
## DES ONGUENTS D'INSECTES?

**L**es végétaux sont une source importante de soins thérapeutiques chez les chimpanzés. Mais Simone Pika, chercheuse à l'université d'Osnabrück, en Allemagne, et ses collègues ont observé une nouvelle pratique de médication chez les chimpanzés de la communauté de Rekambo, au Gabon : ils appliquent des insectes sur leurs plaies ou celles de leurs congénères. Parmi les observations : une mère plaçant des insectes sur la blessure de son petit, ou bien plusieurs individus aidant un mâle à frotter des insectes sur sa plaie. Quel est l'effet de ces insectes ? Pour le savoir, les chercheurs devront les identifier et étudier leurs potentielles propriétés thérapeutiques, notamment dans la cicatrisation, afin de confirmer qu'il s'agit bien d'un comportement de soin. Cette découverte enrichit nos connaissances sur la pharmacopée animale et pourrait résulter d'un phénomène de transmission culturelle. ■

Élisa Doré

S. Pika et al., *Current Biology*, 2022.

# UN MINICOLÉOPTÈRE AU VOL TAILLÉ POUR LA VITESSE



*Paratuposa placentis* est un coléoptère volant d'une taille de 395  $\mu\text{m}$  avec une structure alaire particulière en forme de peigne. Image prise à l'aide d'un microscope électronique à balayage.

**B**ien qu'il soit l'un des plus petits insectes du monde, le coléoptère asiatique *Paratuposa placentis* vole aussi rapidement que des insectes trois fois plus grands ! Comment l'expliquer ? Normalement, plus un insecte est petit, plus il est difficile pour lui de voler vite à cause des frottements de l'air, qui deviennent très visqueux à petite échelle et finissent par surpasser les forces que peut déployer un animal miniature. Mais *P. placentis* présente des ailes et un comportement de vol insolites. Alexey Polilov et son équipe, de l'université Lomonossov à Moscou, ont mis au jour l'étonnant mécanisme du fonctionnement de ses ailes.

À partir de vidéos de coléoptères filmés en vol, les chercheurs ont identifié plusieurs adaptations favorisant les performances aérodynamiques de *P. placentis*. Premièrement, ses ailes ne sont pas membraneuses mais hérissées de longues soies munies d'excroissances, les rendant plus légères qu'une architecture membraneuse de même taille. À petite échelle, le gain en poids de cette structure assure une importante économie d'énergie.

De plus, ce coléoptère bat des ailes selon une trajectoire en huit plutôt que d'avant en arrière comme la plupart des insectes. Un cycle complet comprend deux premiers demi-battements puissants, qui produisent une force ascendante, suivis de deux autres demi-battements, responsables d'une force descendante. Ces mouvements, à cause de la grande amplitude des ailes, devraient soumettre le corps de l'insecte à d'importantes oscillations. Elles sont en fait contrebalancées par les élytres (les ailes rigides qui ne servent pas à voler) qui s'ouvrent et se referment périodiquement. ■

E. D.

S. E. Farisenkov et al., *Nature*, 2022

## BIOPHYSIQUE

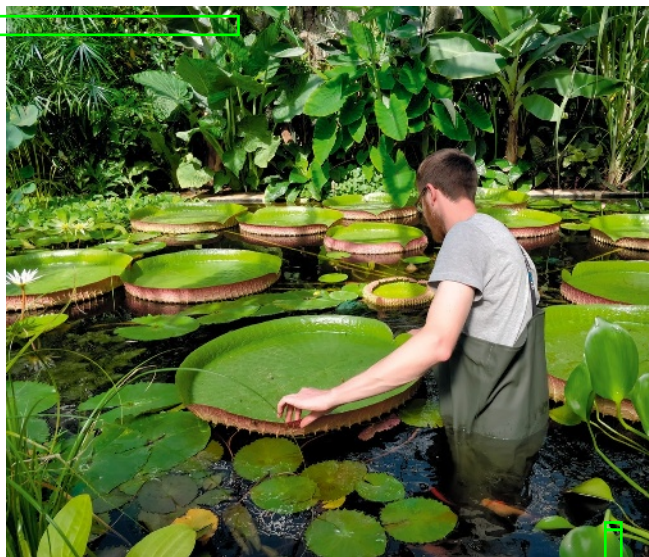
# OPTIMISÉ COMME UN NÉNUPHAR

**L**es feuilles de nénuphar géant d'Amazonie (*Victoria cruziana*) sont les plus grandes feuilles flottantes du règne végétal : elles peuvent atteindre près de 3 mètres de diamètre – dix fois plus que les autres espèces de nénuphars – alors que leur limbe, la partie la plus fine, ne fait qu'environ 1 millimètre d'épaisseur. Malgré cela, elles peuvent supporter le poids d'un petit enfant. Comment expliquer ces caractéristiques exceptionnelles ? Alexander Erlich, de l'Institut de biologie du développement de l'université Aix-Marseille, et ses collègues se sont penchés sur cette question.

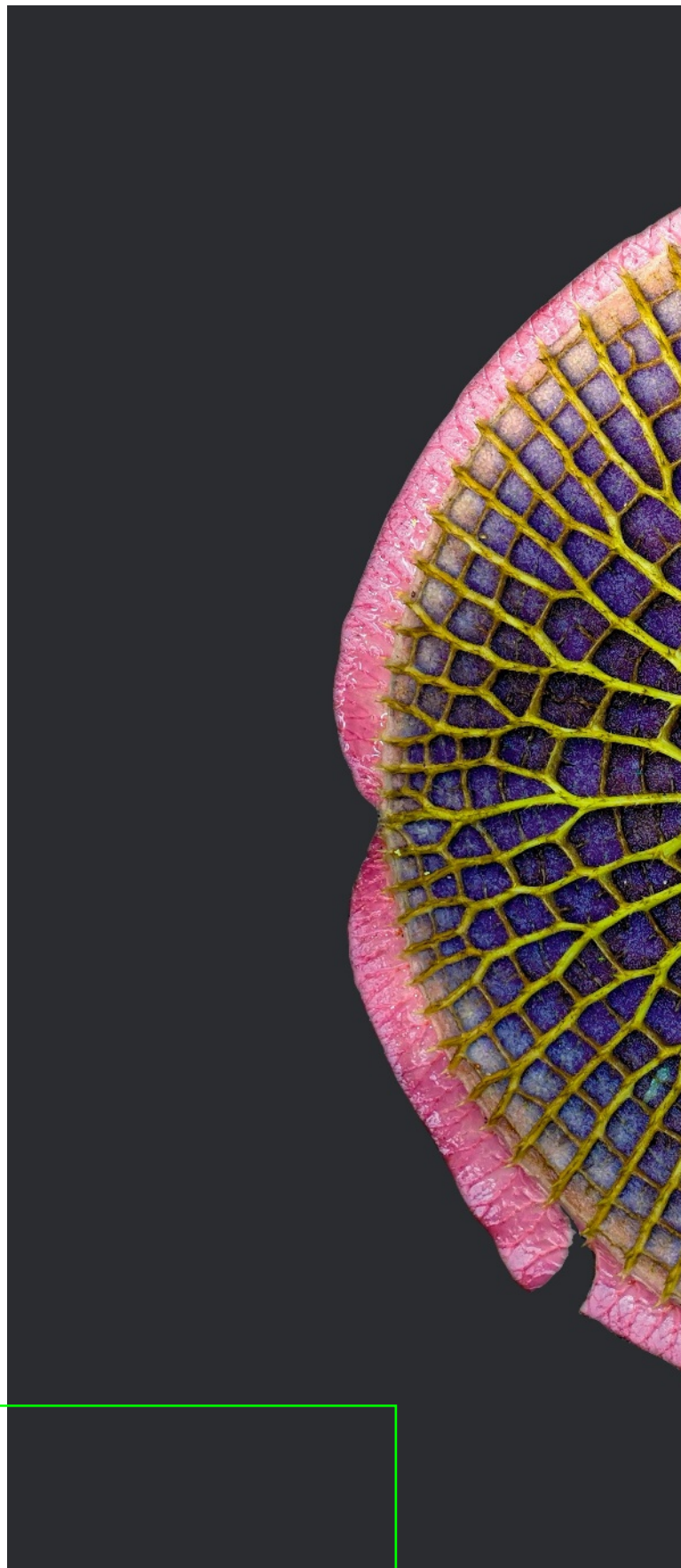
La rigidité des *Victoria* est quarante fois supérieure à celle d'un autre genre de nénuphars, les *Nymphaea*. Les chercheurs ont montré grâce à des simulations numériques que toute la structure de la feuille participe à cette propriété, notamment le réseau fractal de veines ramifiées dont les huit plus grosses ont un diamètre de l'ordre de 5 centimètres. L'équipe a montré que, pour une quantité de matière végétale donnée, cette structure est la plus robuste qu'il soit possible d'imaginer. Un exemple parmi tant d'autres d'optimisation de la nature grâce à l'évolution et la sélection naturelle. ■

Isabelle Bellin

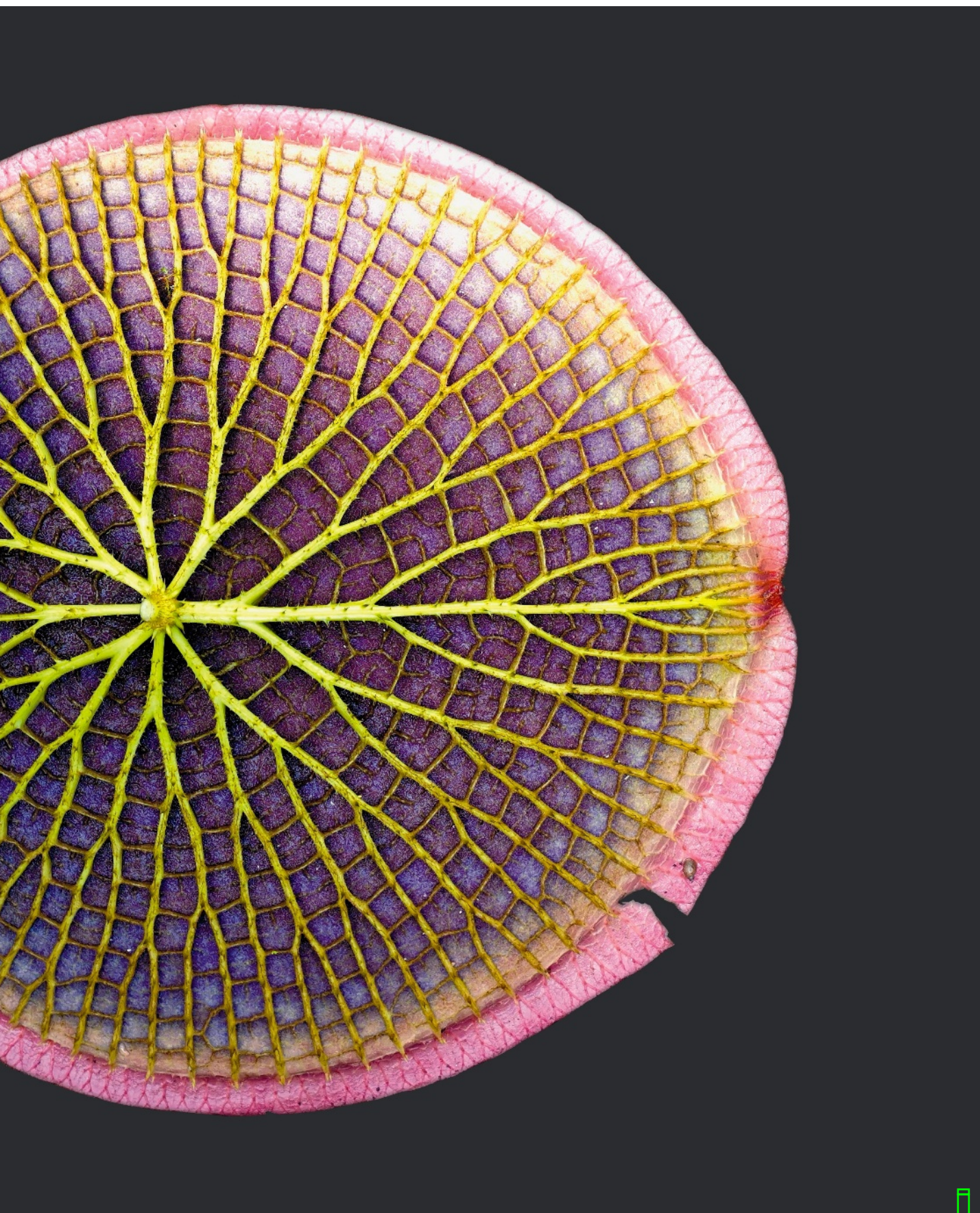
F. Box et al., *Science Advances*, 2022



© F. Box et al.







© F. Box et al.

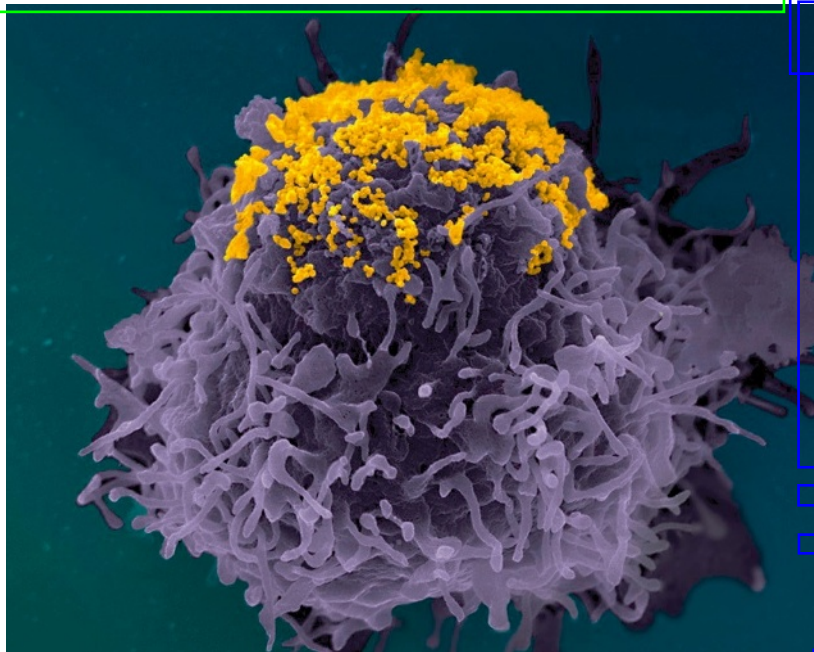


VIROLOGIE

BIOLOGIE VÉGÉTALE

# VIH : DES ANTICORPS SÉQUESTREURS

# LE TOURNESOL CONSERVE SON EAU



Les particules de VIH (en jaune) s'accumulent à la surface d'une cellule infectée (en violet). Image obtenue par microscopie électronique à balayage puis colorisée.

**L**es tournesols affichent des motifs visibles dans l'ultraviolet. Ils seraient impliqués dans l'adaptation de ces plantes à la sécheresse selon Marco Todesco, de l'université de la Colombie-Britannique, au Canada, et ses collègues. Ces derniers ont constaté que les motifs étaient plus grands sur les tournesols présents en milieux secs, et plus petits en milieux chauds et humides. À partir d'une analyse génomique, les chercheurs ont montré qu'un gène, *HaMYB111*, était responsable de la majeure partie de la diversité des motifs floraux. L'expression de ce gène varie selon les conditions locales et contrôle la production de flavonols, des molécules connues pour être impliquées dans des mécanismes qui limitent la transpiration des plantes. ■

E. D.

M. Todesco et al., *eLife*, 2022

BIOCHIMIE

# UN CHAMEAU QUI A DU NEZ

**M**algré les succès des thérapies antirétrovirales contre le virus du sida, la persistance chez les personnes infectées d'un réservoir viral dans leurs cellules reste un obstacle à toute guérison définitive. En effet, lors de l'infection, le virus reste tapi dans certains globules blancs, les lymphocytes T CD4, en s'intégrant dans le génome des cellules hôtes. Lorsque ce réservoir viral se réactive, la réplication virale reprend et, à ce jour, aucune thérapie ne permet d'empêcher ces événements, qui aboutissent à l'infection de nouvelles cellules. La recherche est donc intense autour de nouvelles stratégies, dont celles des anticorps neutralisants à large spectre (bNAbs). Présents chez certains patients, ces anticorps sont capables de reconnaître des protéines de l'enveloppe du virus et jouent un rôle antiviral avec une efficacité inégalée à ce jour, diminuant l'infection de nouvelles cellules. « Beaucoup d'espoirs sont placés dans ces bNAbs, notamment car on peut les combiner pour élargir plus encore leur spectre d'activité », note Timothée Bruel, de l'institut Pasteur, à Paris.

Avec ses collègues, ce chercheur vient d'identifier un nouveau mécanisme d'action chez les bNAbs. Ces anticorps sont capables de séquestrer les particules virales libérées par les cellules infectées à la surface de celles-ci, ce qui diminue la prolifération virale. Reste encore à comprendre comment ce nouveau mécanisme s'articule dans le schéma antiviral d'action des bNAbs. « Nous savons que ces complexes immuns antigène-anticorps sont très puissants pour déclencher des réponses immunitaires, il est donc tout à fait possible qu'ils entraînent *in vivo* le recrutement de cellules immunitaires qui vont alors les capturer et les éliminer », suggère Timothée Bruel. ■

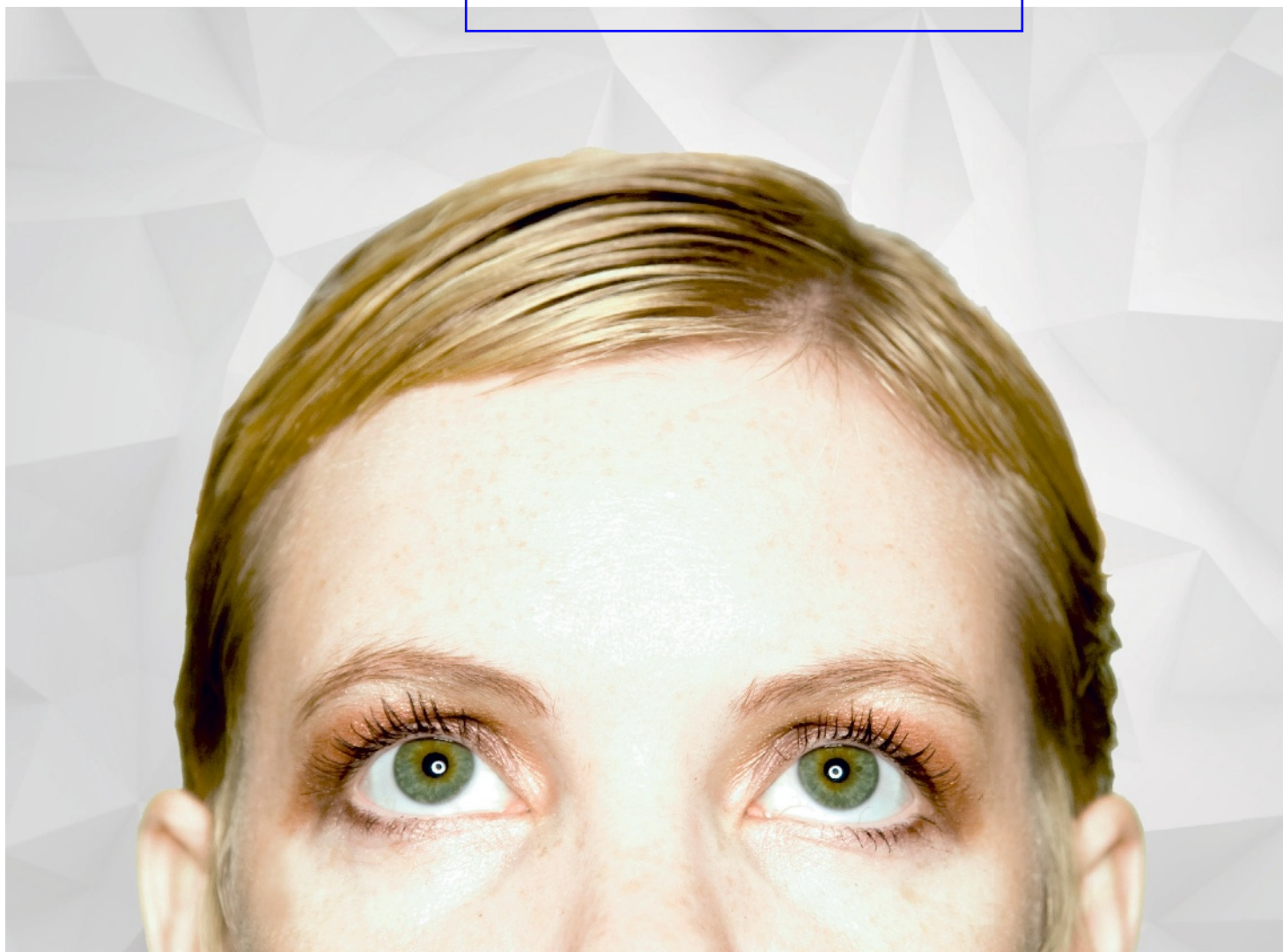
Noëlle Guillon

J. Dufloo et al., *Nature Communications*, 2022

**L**e nez du chameau est un excellent détecteur d'humidité, qui permet à l'animal de repérer une source d'eau éloignée. Grâce à ses parois tapissées de mucus, il extrait aussi l'humidité de l'air exhalé, limitant les pertes d'eau en milieu aride. Li Caicong, de l'Institut de recherche sur la structure de la matière du Fujian, en Chine, et ses collègues se sont inspirés de cet organe pour développer un capteur sensible aux fluctuations d'humidité. Ils ont créé un réseau de polymères poreux pour démultiplier les surfaces, qu'ils ont recouvert de zwitterions, des molécules imitant les propriétés physicochimiques du mucus du chameau. Les zwitterions facilitent l'interaction de l'eau et de la structure poreuse en régulant l'adsorption et la désorption des molécules d'eau. Un tel capteur pourrait servir, par exemple, à la création de dispositifs sans contact sensibles à la seule transpiration cutanée. ■

E. D.

Li Caicong et al., *ACS Nano*, 2021



**AcademiaNet** offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

**AcademiaNet**, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème «Women in Science»

## Partenaires

Robert Bosch Stiftung

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**

**Pour la Science**



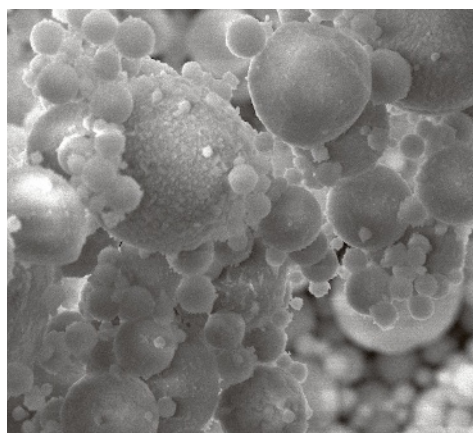
CHIMIE

## EXTRAIRE LES TERRES RARES DES DÉCHETS

**L**es terres rares portent mal leur nom : ces dix-sept espèces chimiques sont plus abondantes sur Terre que l'or, et la plus commune, le cérium, y est même plus présente que le cuivre. Mais elles restent très difficiles à exploiter. Leur extraction dans les gisements, puis leur séparation d'autres espèces et entre elles, est très coûteuse en moyens et en énergie. Et ces procédés sont très polluants. L'équipe de James Tour, de l'université Rice, à Houston, aux États-Unis, a développé une technique pour faciliter leur extraction de certains déchets, avec une efficacité bien supérieure aux méthodes existantes.

Les chercheurs se sont focalisés sur trois principaux types de déchets renfermant des terres rares : les cendres volantes, issues de la combustion du charbon, rejetées par les centrales énergétiques ; les résidus de bauxite, ou « boue rouge », sous-produit toxique issu d'une technique courante de fabrication d'aluminium ; et enfin les déchets électroniques. Selon une étude antérieure, au cœur des 750 millions de tonnes de cendres volantes produites chaque année dans le monde se cachent 500 tonnes de terres rares.

Pour extraire les terres rares, l'équipe de James Tour propose de placer le déchet dans un tube de quartz, pressé entre deux électrodes. Le



Ces petites billes vitreuses présentes dans les cendres volantes contiennent des terres rares. Un processus de chauffage instantané par effet Joule permettrait de les séparer plus facilement des déchets.

montage est électrifié rapidement et à très haute intensité. Grâce à l'effet Joule, le matériau est porté en 1 seconde à environ 3000 °C ! À une telle température, les terres rares comme les espèces qui les renferment deviennent alors beaucoup plus faciles à dissoudre. Le rendement de l'extraction par dissolution est doublé avec une solution d'acide chlorhydrique 150 fois moins concentrée que dans les approches classiques. ■

Valentin Rakovsky

B. Deng et al., *Science Advances*, 2022

PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

## COMMENT LES TISSUS SÈCHENT

**A**vec l'épidémie de Covid-19, un intérêt tout particulier a été porté sur la physique des tissus et notamment sur l'interaction des fibres avec la vapeur d'eau. On pourrait penser que la physique du séchage du linge est connue de longue date, mais ce n'est pas le cas car il était jusqu'ici difficile de tester les modèles. Philippe Coussot, du laboratoire Navier, à Champs-sur-Marne, et ses collègues ont résolu cet obstacle. Ils ont utilisé un appareil de résonance magnétique nucléaire (RM) pour suivre les molécules d'eau au sein d'un tissu. Les chercheurs ont ainsi confirmé leur modèle qui s'appuie sur trois mécanismes : la diffusion de l'eau liée aux fibres, qui peut se déplacer à l'intérieur des fibres mêmes, la diffusion de la vapeur d'eau dans les pores du matériau et les échanges locaux entre l'eau liée et la vapeur d'eau. En fonction du taux d'humidité,



la vapeur d'eau peut rentrer dans la fibre (sorption) ou l'eau liée en sortir (désorption). Comme attendu, c'est le transport de la vapeur d'eau dans le réseau poreux qui constitue le moteur du séchage. ■

Sylvain Guilbaud

Xiaoyan Ma et al., *Physical Review Applied*, 2022

EN BREF

### Dopamine pour sommeil paradoxal

Chez les mammifères le sommeil est constitué de cycles qui alternent entre des phases de sommeil lent et paradoxal. Mais comment s'opère la transition entre les phases ? L'équipe de Takeshi Sakurai, de l'université de Tsukuba, au Japon, suggère chez le rat qu'une activation de la dopamine, le neurotransmetteur « du plaisir », dans une région du cerveau (l'amygdale basolatérale) durant le sommeil lent, mettrait fin à cette phase et amorcerait celle du sommeil paradoxal.

Science, 4 mars 2022

### La Vénus aux origines italiennes

Retrouvée il y a cent ans sur les rives du Danube, en Autriche, la Vénus de Willendorf, une statue figurant une femme, date de 30 000 ans. Elle a été sculptée dans du calcaire oolithique absent de cette région. Grâce à la tomodensitométrie, une technique d'imagerie l'anthropologue Gerhard Weber, de l'université de Vienne, et ses collègues viennent de préciser l'origine de la roche : elle provient du nord de l'Italie. Un long voyage aurait conduit l'artefact sur les berges du Danube

Nature, 28 février 2022

### Toutes les rivières contaminées

La contamination des cours d'eau par des produits pharmaceutiques, notamment des antibiotiques, était surtout documentée en Europe et en Amérique du Nord. Un projet international, dirigé par John Wilkinson, de l'université d'York, au Royaume-Uni, portant sur 258 rivières de 104 pays, et destiné à fournir une vision mondiale de la situation, confirme le phénomène global. Dans 25 % des échantillons, au moins un composé a une concentration qui dépasse les seuils de toxicité pour les organismes aquatiques.

PNAS, 22 février 2022

**Bulle galactique**

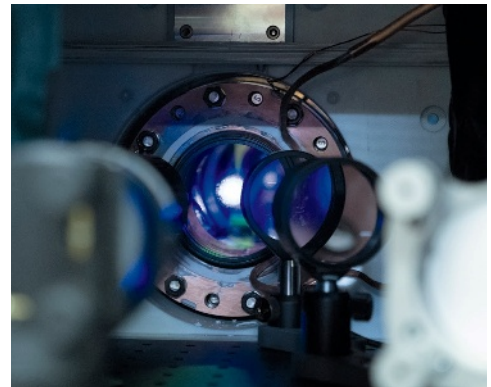
Le Système solaire se trouve au sein d'une bulle géante issue de l'explosion de supernovæ il y a 14 millions d'années. Catherine Zucker, du centre d'astrophysique de Harvard et Smithsonian, et ses collègues ont retracé son histoire. La plupart des étoiles situées à moins de 650 années-lumière du Soleil se seraient formées à la suite de la création et de l'expansion de la bulle. Si le Système solaire se trouve actuellement en son centre, ce n'est qu'un hasard ! Le Soleil aurait pénétré la bulle il y a 5 millions d'années et continué sur sa propre trajectoire. Comme la probabilité de se trouver au centre d'une telle bulle est faible, cela implique qu'il en existerait un grand nombre dans la Galaxie.

*Nature*, 16 janvier 2022

**EINSTEIN AU MILLIMÈTRE**

En 1976, la sonde *Gravity Probe A*, à 10 000 kilomètres d'altitude au-dessus de la surface de la Terre, a mesuré avec une horloge de précision un effet prédit par la relativité générale. En effet, le champ gravitationnel d'un objet massif (comme la Terre) déforme l'espace-temps de sorte que le temps s'écoule plus lentement quand on est près de l'objet. On parle de décalage d'Einstein. La sonde a ainsi montré que le temps file plus vite de 1 seconde tous les 73 ans sur son orbite, comparé au temps au niveau du sol.

Depuis quarante ans, la précision des horloges a beaucoup progressé. Actuellement, la technique la plus précise s'appuie sur des nuages d'atomes piégés dans des faisceaux laser et dont on mesure la fréquence de transition entre deux états électroniques. Dans sa nouvelle expérience, l'équipe de Jun Ye, de l'université du Colorado, a utilisé des atomes de strontium ultrafroids, organisés selon des couches empilées verticalement. L'ensemble



Le temps s'écoule différemment entre le bas et le haut d'une pile d'atomes de strontium haute de 1 millimètre.

s'étend sur 1 millimètre de hauteur. Les chercheurs ont mesuré la fréquence de transition des couches les plus proches du sol à celle des plus éloignées. Ils ont ainsi mis en évidence le décalage d'Einstein sur 1 millimètre. Un tour de force car l'amplitude de l'effet est 20 milliards de fois plus faible que pour *Gravity Probe A* ! ■

S. B.

T. Bothwell et al., *Nature*, 2022

**L'ODYSSÉE SENSORIELLE**

EXPOSITION

Devenez des explorateurs le temps d'un incroyable voyage autour du globe, de l'équateur au Grand Nord. À l'aide de tous vos sens, plongez au cœur de la biodiversité et laissez-vous guider par la poésie de notre planète !

**FÊTE DES SENS**

WEEK-END ÉVÉNEMENT LES 23 ET 24 AVRIL

Venez profiter d'expériences sensorielles inédites, pour tous les âges au cœur du Jardin des Plantes :

**goûtez** le miel du Muséum et **découvrez** le rucher, **suivez** les « Chanteurs d'oiseaux » lors d'une balade gazouillante, **arpentez** le jardin au son d'une radio éphémère vivante, **découvrez** le métier de nez, **participez** à une déambulation insolite les yeux fermés, **dégustez** des glaces, du chocolat et du cacao sous diverses formes.

Retrouvez tout le programme et réservez vos billets sur [jardindesplantesdeparis.fr](http://jardindesplantesdeparis.fr)

Pour la Science

MUSÉUM  
DE PARIS  
NATURAL  
HISTOIRE

SENSORY  
OdySeY

**L'ODYSSÉE  
SENSORIELLE**

Exposition • Jusqu'au 4 juillet 2022

GRANDE GALÉRIE  
DE L'ÉVOLUTION

Jardin des Plantes  
Paris 5<sup>e</sup>  
#OdysséeSensorielle



**BIOLOGIE**

**L'ORIGINE DU MONDE**

Marc-André Selosse

Actes Sud, 2021  
480 pages, 24 euros



L'auteur est bien connu, non seulement en tant que biologiste-écologue d'envergure, mais aussi par son œuvre de dissémination de la science. Écrit sur un ton léger – savez-vous ce qu'est le scopélisme? – ce livre nous raconte l'histoire naturelle du sol, cette couche que nous piétons, dont nous nous méfions parfois, et que nous connaissons si peu. Il s'adresse à toute personne ayant les pieds sur terre, par exemple aux jardiniers, aux agriculteurs, aux curieux de nature et aux propriétaires de plantes en pots. Toutefois, les chercheurs et les étudiants y découvriront aussi entre les lignes une synthèse passionnante des connaissances actuelles sur le sol dans tous ses états. Les acteurs principaux dépeints sont hauts en couleur, à commencer par l'argile, le limon, le sable, l'eau, les vers de terre, les plantes, les champignons et les bactéries. L'auteur nous rappelle en effet que le sol, mélange de roche mère et de matière organique, est vivant. Du reste, son immense biodiversité reste inconnue à 99%... Il couvre aussi d'éloges... la lenteur. Celle de la formation des sols: des siècles sont par exemple nécessaires pour créer des tourbières, ces exceptionnelles fixatrices de carbone. À notre tour de vanter la lenteur avec laquelle il faut s'immerger dans ce livre, le lire et le relire en esthète, le regard contemplatif. Ces lenteurs contrastent avec la vitesse de changement du monde et de son climat... Ce décalage nous met face à nos responsabilités: nos sols représentant notre lien le plus fort avec la Terre, si nous poursuivons leur destruction, nous nous condamnons nous-mêmes. Dès lors, l'auteur nous incite à la «sobriété heureuse», selon laquelle le sol n'est pas sale, mais moelleux et accueillant. Suivons donc le conseil de l'auteur et arpentons-le pieds nus.

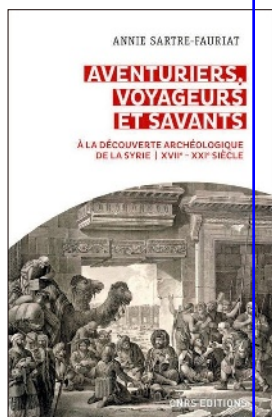
FABIEN ANTHELMÉ  
IRD, Montpellier

**ARCHÉOLOGIE**

**AVENTURIERS, VOYAGEURS ET SAVANTS**

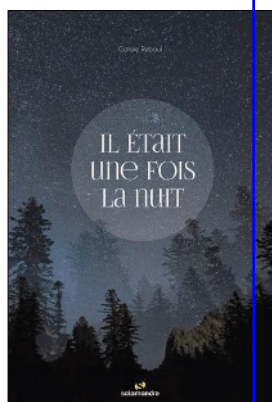
Annie Sartre-Fauriat

CNRS, 2021  
304 pages, 24 euros



L'auteur retrace de manière vivante les étapes de la redécouverte de la Syrie, narre son histoire et évoque ses sites antiques. Après le temps des pèlerinages, nous suivons les premiers explorateurs du XVII<sup>e</sup> siècle, puis les chasseurs de trésors, marchands et antiquaires du XVIII<sup>e</sup> siècle. Certains, éduqués et parlant arabe, se déguisent pour déjouer la défiance des habitants et les attaques des tribus du désert originaires d'Arabie. Au XIX<sup>e</sup> siècle, après la prise de Damas par l'Égyptien Ibrahim Pacha, le pays dorénavant plus sûr est parcouru par des érudits, issus de riches familles, soutenus par leurs institutions scientifiques. Ils copient de nombreuses inscriptions grecques, latines, sémitiques et saïtiques et font des croquis des restes architecturaux. À partir de 1920, sous le Mandat français, les missions archéologiques se multiplient, avec la mise en place d'un service des Antiquités. Des découvertes fortuites permettent d'ouvrir des fouilles à Doura-Europos (1920), Ougarit (1928) ou encore Mari (1933). Malheureusement, en mars 2011, cette collaboration scientifique centenaire entre Syriens et étrangers s'interrompt alors qu'éclate la guerre civile, qui a fait plusieurs centaines de milliers de morts à ce jour et détruit de manière irréparable le patrimoine archéologique de la Syrie. Professeuse émérite de l'université d'Artois, Annie Sartre-Fauriat connaît très bien le pays. Elle a publié sur de nombreuses inscriptions grecques et latines, en particulier funéraires. Son ouvrage fait la part belle à Palmyre, l'un des sites qui a le plus souffert ces dix dernières années. Comme tous les spécialistes du Proche et du Moyen-Orient ancien, c'est non sans déchirement qu'elle décrit les dégâts infligés par les armées syriennes et russes et les djihadistes sur les sites syriens multimillénaires.

CÉCILE MICHEL  
CNRS, Arscar-Haroc



## ASTRONOMIE

### IL ÉTAIT UNE FOIS LA NUIT

Carole Reboul

La Salamandre, 2021  
200 pages, 39 euros

Lumière des étoiles, lumière des hommes... Progressivement, en bien des lieux que nous fréquentons et au-delà, c'est cette dernière qui a pris le dessus. Éclairés artificiellement, nous nous sentons plus en sécurité, nos édifices sont mis en valeur, la vie nocturne est facilitée... Ce faisant, nous nous sommes coupés de la véritable nuit, sans vraiment prendre conscience de ce que nous avons perdu. C'est ce que nous montre l'autrice de ce superbe livre grand format engagé et engageant. Les images de cette photographie, de styles et d'échelles très variés, du panoramique à la macrophotographie, parfois impressionnantes (voûte céleste en rotation, Voie lactée désormais si difficile à bien observer...), souvent oniriques, mettent en contraste ce que la lumière artificielle nous oblige, nous permet ou nous empêche de voir. Chaque photographie, en double page, est accompagnée d'un court texte relatif à l'observation du ciel hier, aujourd'hui (avec une surenchère des illuminations rendue possible par le moindre coût énergétique des LED) et demain (avec des projets fous comme la Lune perpétuelle ou la menace des constellations de satellites). Ces textes ouvrent aussi la réflexion sur les multiples problématiques, astronomiques mais surtout écologiques, associées à la pollution lumineuse. On sait par exemple qu'elle nuit à la faune, ce dont nous nous préoccuons à la marge seulement, alors que nous en faisons partie... Ces questions sont abordées sous un angle ici scientifique, là plus intime du rapport de l'autrice à la nature. Des solutions concrètes sont proposées pour lutter contre cette pollution lumineuse. Enfin, précisons que pour chaque cliché les données du triangle d'exposition sont indiquées, ce qui sera certainement une aide et une incitation pour les amateurs émerveillés à tenter leurs propres escapades photographiques nocturnes!

CHRISTOPHE PICHON  
IAP

## GÉNÉTIQUE

### L'HÉRÉDITÉ COMME ON NE VOUS L'A JAMAIS RACONTÉE

Étienne Danchin

Humensciences, 2021  
240 pages, 21 euros

Une mouette est à l'origine de cet ouvrage! C'est en effet au cours de sa longue observation de la mouette tridactyle des falaises du cap Sizun, en Bretagne, que l'auteur est «né à la biologie évolutive». Après toute une carrière dans ce domaine, il nous offre ici un livre, riche de ses expériences personnelles et professionnelles, qui traduit son envie d'éclairer d'un jour nouveau la synthèse actuelle sur l'évolution. Cette synthèse moderne et inclusive que l'auteur promeut vise à intégrer toutes les formes de transmission d'informations transgénérationnelles. Ainsi, il nous pousse au fil des pages à prendre conscience du fait que les gènes ne sont pas seuls à l'origine de l'hérédité: l'environnement naturel ou culturel d'une espèce joue aussi un rôle crucial. Dès lors, les hérédités culturelle et épigénétique existent en plus de l'hérédité génétique. Notion multifactorielle, l'hérédité se compose de plusieurs niveaux emboîtés, à l'image des poupées russes de la couverture. Directeur de recherche au CNRS (émérite), Étienne Danchin nous raconte avoir été d'abord agacé de se voir imposer des heures d'enseignement à l'université: une «perte de temps»! Puis l'expérience s'est avérée passionnante, lorsqu'il s'est rendu compte que le contact avec les étudiants était profitable au développement de sa vision intégrative de l'évolution. Dans un langage spécialisé, mais adapté au plus grand nombre, il nous présente les concepts biologiques permettant d'appréhender pourquoi la passation de notre patrimoine à notre descendance comprend, certes, un ensemble de gènes et de traits culturels, mais aussi, et surtout, un environnement. Si nous le détruisons et l'altérons trop, nous ne pourrions plus le transmettre! Cette facette environnementale de l'hérédité est cruciale et représente un enjeu majeur pour tout un chacun. Voilà le message fort de l'auteur.

CAROLINE COSTEDOAT  
Aix-Marseille-Université

## ET AUSSI



### SERVITUDES VIRTUELLES

Jean-Gabriel Ganascia

Seuil, 2022

320 pages, 21 euros

L'auteur se demande de quelle façon nous sommes asservis dans notre vie numérique. Il commence par définir une « Rose des vents numérique », dont les quatre points cardinaux sont « en ligne », « hors ligne », « en vie », « hors vie », puis s'en sert pour répertorier et analyser de dangereux effets potentiels de la vie numérique: le rêve de mise en ligne directe du cerveau, celui de la numérisation de la conscience, la difficulté sociale d'être hors ligne, l'isolement social induit par les objets... communicants. Cet ouvrage aussi touffu que le sujet traité ouvre d'importantes pistes de réflexion.

### HARALD À LA DENT BLEUE

Lucie Malbos

Passés composés, 2022

288 pages, 22 euros

Harald à la Dent bleue fut roi du Danemark pendant la seconde moitié du X<sup>e</sup> siècle. L'autrice constitue le dossier de tout ce que l'on peut apprendre sur lui en lisant les textes médiévaux ou d'après l'archéologie. Il en ressort le portrait fascinant parce que trouble d'une grande figure du temps des Vikings, qui en unifiant les Danois et en leur faisant rejoindre la religion chrétienne entraîna la Scandinavie dans la civilisation médiévale occidentale.

### UN TANGUY CHEZ LES HYÈNES

François Verheggen

Delachaux et Niestlé, 2022

192 pages, 22,90 euros

En une série de textes descriptifs, mais plaisants, l'auteur nous présente trente comportements surprenants chez les animaux. Dans les matriarchies des hyènes, des « fils à maman » (des Tanguy) restent près de leur mère de haut statut. Les sitelles à poitrine rousse – de petits passereaux – préviennent leurs proches à l'aide d'un chant si aigu qu'il en devient inaudible pour les prédateurs. Tous les quatre ans, les lemmings de Norvège se lancent dans des migrations « à haut risque » après avoir épuisé le territoire où ils sont nés, etc. La nature n'a jamais fini de nous étonner.





La chronique de  
**CATHERINE AUBERTIN**

économiste de l'environnement, directrice de recherche  
à l'IRD et membre de l'UMR Paloc  
au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

# LES TERRES À BOUT DE SOUFFLE

Comment lutter contre le réchauffement climatique sans nuire à la biodiversité, et vice versa ? En respectant les terres et en les réparant.



L'avenir de la Terre repose sur le bon état des terres.

Total de La Mède reposait sur l'huile de palme et la centrale thermique de Gardanne, peinant à exploiter les forêts alentour, importait des plaquettes du Brésil. Ici, l'exportation de la production primaire des sols des pays du Sud au bénéfice de ceux du Nord pose problème en termes d'équité géopolitique, de justice sociale, de conséquences environnementales et sanitaires.

Combien de kilomètres carrés d'espaces agricoles, naturels ou forestiers, faudrait-il détourner pour répondre à une demande d'énergie toujours croissante ? La même question de la disponibilité en terres se pose devant les projets qui prétendent à la neutralité carbone en compensant les émissions de CO<sub>2</sub> par des plantations ou par leurs achats sur les marchés du carbone forestier. Dilemme...

## LES TERRES... À TERRE

Peut-être serait-il bon de rappeler que la biodiversité des sols est à la base de tous les processus écologiques terrestres, que plus de 70 % des écosystèmes terrestres ont été modifiés et que un cinquième des terres, plus de 2 milliards d'hectares, sont considérés comme dégradés. Il est beaucoup trop demandé aux terres : nourrir l'humanité, fournir des matériaux, restaurer les écosystèmes dégradés par l'agriculture industrielle... et pourvoir aux besoins de la transition énergétique.

Pourquoi alors ne pas inverser le raisonnement et privilégier la biodiversité ? Plutôt que demander toujours plus aux terres, réparons-les d'abord en améliorant leur capacité de stockage de carbone organique dans les sols. Les pratiques agricoles pour réduire les émissions sont connues et adaptables selon les régions. Elles impliquent entre autres de repenser les systèmes alimentaires, c'est-à-dire les consommations et les échanges internationaux, et donc les modes de vie que nous a offerts l'exploitation des énergies fossiles. C'est indispensable, car, ne rêvons pas, les terres, même en bonne santé, ne suffiront pas à elles seules à garantir la transition énergétique. ■

**L**e rapport conjoint du Giec et de l'IPBES, paru en 2021, appelait à prendre en compte les interactions réciproques du climat et de la biodiversité. En un mot, la lutte contre le changement climatique et la reconquête de la biodiversité sont à mener de concert. Est-ce le cas dans les faits ? Pas sûr... car force est de constater que la volonté affichée de sortir des énergies fossiles, principales responsables des émissions de gaz à effet de serre (GES), à l'origine du réchauffement climatique, soumet la biodiversité à rude épreuve.

Pour réduire la dépendance aux énergies fossiles, une solution consiste à consacrer des espaces à la production d'énergies renouvelables, par exemple en y installant des panneaux solaires ou en cultivant de la biomasse. Cela ne va pas sans contradiction. Par exemple, la loi Climat et résilience exclut les surfaces allouées au photovoltaïque du comptage des sols artificialisés, dès lors que leurs fonctions écologiques ne sont pas

durablement affectées. Mais la même loi fixe un objectif de zéro artificialisation nette ! L'agrivoltaïque se développe pour résoudre le paradoxe et se traduit par quelques cultures ou moutons sur de vastes champs recouverts de panneaux

## La biodiversité des sols est à la base de tous les processus écologiques terrestres

solaires. On peut douter du gain de l'opération pour l'agriculture, les paysages et la biodiversité.

Au niveau international, que les plantations de canne à sucre au Brésil ou de maïs au Mexique destinés à la production d'éthanol entrent en compétition avec des terres agricoles en choque plus d'un. En France, la bioraffinerie

ON A MENÉ

L'ENQUÊTE

TOUS LES PAPIERS  
SE RECYCLENT.

---

JOURNAUX, MAGAZINES, PAPIERS MÊME AVEC  
AGRAFES, ENVELOPPES MÊME SANS FENÊTRE,  
CAHIERS MÊME AVEC SPIRALES...  
TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.  
EN LES DÉPOSANT DANS LE BAC DE TRI,  
VOUS LEUR OFFREZ UNE NOUVELLE VIE.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE  
SUR [TRIERCESTDONNER.FR](http://TRIERCESTDONNER.FR)

---

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits



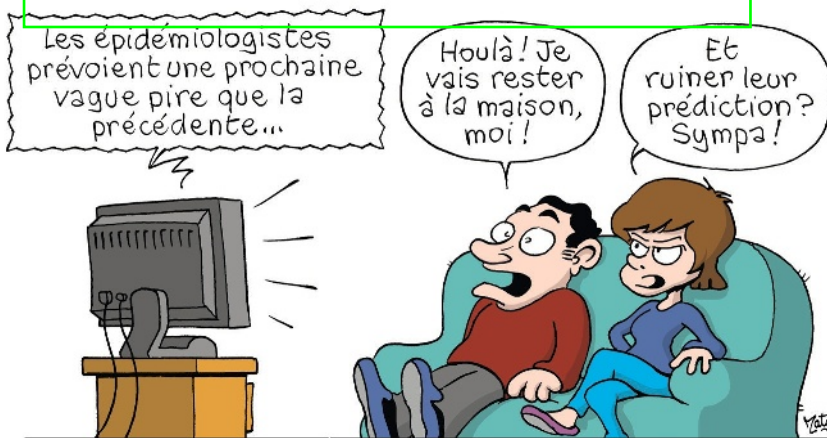


La chronique de  
**YVES GINGRAS**

professeur d'histoire et sociologie des sciences  
à l'université du Québec à Montréal, directeur scientifique  
de l'Observatoire des sciences et des technologies, au Canada

## DES MODÈLES POUR PRÉVOIR ET PRÉDIRE

Présenter au public les modélisations du Covid-19  
comme de simples scénarios risque de masquer  
leur capacité prédictive.



**D**epuis maintenant deux ans, l'irruption du virus SARS-CoV-2, cause du Covid-19, a eu pour effet positif de rendre visible le travail scientifique comme jamais auparavant. Ce sont surtout les concepts et méthodes de l'épidémiologie qui ont été largement expliqués au grand public. On a entendu parler pour la première fois de concepts mathématiques comme le « $R_0$ », ce coefficient qui détermine la vitesse initiale de propagation d'une infection virale, mais surtout de «modélisation» et de «simulation» de l'épidémie, laquelle donne lieu à des «scénarios», des «projections» et des «prévisions» qui visent à anticiper les effets attendus dans les jours et les semaines qui suivent le début de la transmission du virus.

Alors que la visée habituelle d'une science est d'établir les lois d'un phénomène et de tenter de prédire, sous certaines hypothèses, son évolution temporelle, la multiplication des termes utilisés mène parfois à sous-estimer

l'aspect prédictif des simulations épidémiologiques en disant, par exemple, que ce ne sont pas des prédictions mais seulement des «scénarios» ou, pis encore, qu'on ne peut pas prédire l'avenir! Sur le plan épistémologique, de telles déclarations sèment

**Même approximatif,  
un modèle est utile  
à la planification  
du futur proche**

la confusion et il serait préférable d'expliquer mieux le rôle des modèles.

Un modèle vise à représenter, de manière plus ou moins simplifiée, un phénomène. S'il est adéquat, il permet de comprendre ses principales caractéristiques. Pour saisir les changements dans le temps, il faut des modèles dynamiques. Cette classe inclut les modèles météorologiques

et épidémiologiques. Or, tout comme les premiers prédisent assez bien la météo à quelques jours, même s'ils sont peu fiables après environ une semaine, de même les seconds ont aussi, par construction, une bonne capacité prédictive.

De manière générale, un modèle comporte une fonction contenant plusieurs variables et des paramètres. Dans les modèles dynamiques, des conditions dites «initiales» fixent la valeur des paramètres. Chaque ensemble de ces paramètres ainsi fixés définit un «scénario» qui permet de prédire l'évolution à venir si les conditions initiales retenues sont réalisées et ne changent pas radicalement dans les jours qui suivent. La différence fondamentale entre les modèles météorologiques et épidémiologiques est que contrairement aux atomes de l'atmosphère, les personnes sont réflexives et peuvent modifier leurs comportements à la lumière d'informations nouvelles, ce qui modifie alors la valeur des coefficients du modèle.

Les paramètres du modèle météo (vitesse du vent, pression, température) ne sont pas affectés par les comportements humains pour la période couverte par la prédiction. En revanche, paramètre important d'un modèle épidémiologique, le nombre de contacts entre personnes peut changer rapidement après l'annonce de prévisions alarmistes et ainsi mener à des changements de comportements qui rendent alors caduques les hypothèses initiales. Dans un tel cas, il est évident que les prédictions seront erronées si on ne «réinitialise» pas le modèle avec la nouvelle valeur du nombre de contacts.

En somme, les «scénarios» sont bien des prévisions et des prédictions, qui se réaliseront si les valeurs des paramètres sont les bonnes. Il n'y a donc aucune raison de minimiser la visée prédictive des modèles épidémiologiques auprès du public. On observe d'ailleurs que même lorsque les conditions changent un peu, les prévisions donnent une très bonne idée de la tendance générale de diffusion des infections et des hospitalisations qui suivent après quelques jours. Ils restent donc très utiles à la planification du futur proche. ■

## LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

**Dans la collection *Thema* découvrez aussi**



Commandez et téléchargez  
les numéros en pdf



<https://boutique.groupepourlascience.fr>

## L'ESSENTIEL

> Plus de trente entreprises privées dans le monde développent des projets de réacteur à fusion nucléaire.

> Tokamaks, réacteurs linéaires ou à cible magnétisée, stellarators... Plusieurs concepts sont explorés simultanément.

> Les défis techniques sont encore nombreux : stabilité du plasma, évacuation de la chaleur produite ou tenue des matériaux aux températures très élevées requises pour la fusion, notamment. Certaines entreprises n'en annoncent pas moins pouvoir aboutir à des réacteurs commercialisables au cours de la décennie 2030.

## L'AUTEUR



**PHILIP BALL**  
auteur et rédacteur scientifique basé à Londres. Il contribue notamment à *Nature* et *New Scientist*

# Fusion nucléaire la grande accélération

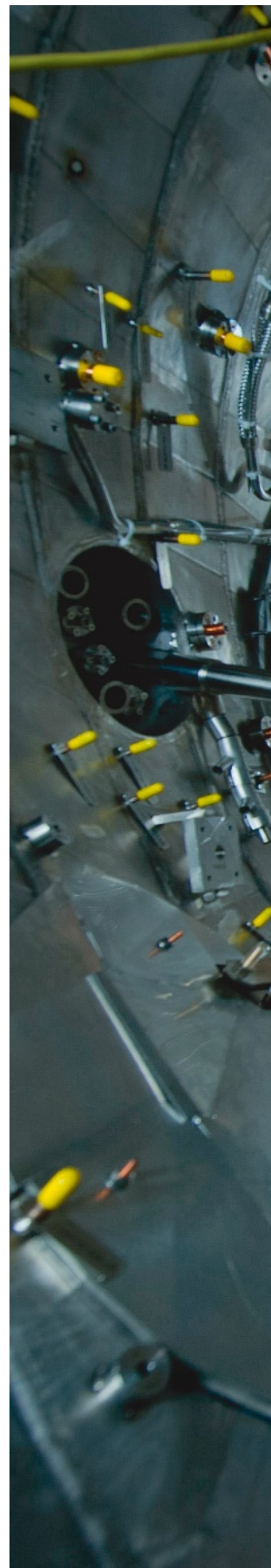
De nombreuses entreprises privées se lancent dans la course à la fusion nucléaire. Elles espèrent mettre au point des réacteurs commercialement exploitables au cours de la prochaine décennie.

**L**e vieux village de Culham, niché dans un coude de la Tamise à l'ouest de Londres, n'apparaît pas à première vue comme l'endroit où se dessine le futur. Pourtant, l'année prochaine, on y commencera la construction d'un bâtiment de verre et d'acier étincelant qui pourrait abriter ce que beaucoup considèrent comme une technologie essentielle pour répondre à la demande d'énergie propre au <sup>xxi</sup>e siècle et au-delà : la fusion nucléaire.

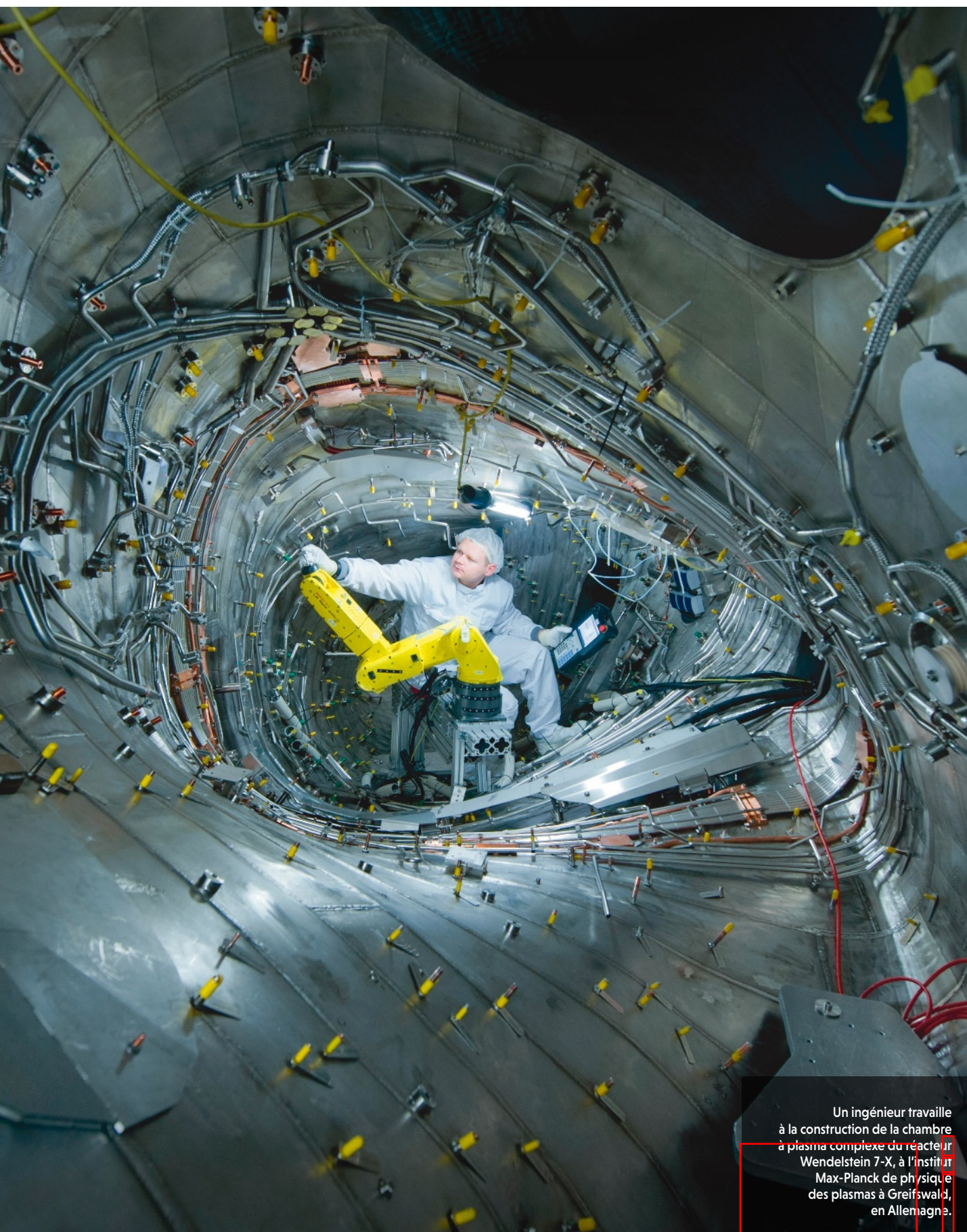
Longtemps considérée comme une perspective à long terme, la fusion semble enfin s'approcher de sa mise en application. Selon une enquête menée en octobre 2021 par la Fusion Industry Association (FIA), une association située à Washington qui représente les entreprises du secteur, plus de trente entreprises privées, désormais, travaillent sur la fusion dans le monde. Parmi elles, les

dix-huit entreprises qui ont rendu public leur financement affirment avoir récolté plus de 2,4 milliards de dollars au total (2,1 milliards d'euros), presque entièrement issus d'investissements privés. La clé de ce regain d'intérêt réside dans les progrès réalisés ces dernières années dans la science des matériaux et dans les capacités informatiques, qui permettent d'imaginer des approches différentes de celles sur lesquelles les agences nationales et internationales travaillent depuis si longtemps.

Le dernier projet en cours à Culham – où réside le centre de recherche britannique sur la fusion – est une centrale de démonstration opérée par General Fusion, une société canadienne située à Burnaby. Sa mise en service est prévue pour 2025, et l'entreprise vise la vente de réacteurs à fusion dès le début de la prochaine décennie. Il s'agira de « la première







Un ingénieur travaille  
à la construction de la chambre  
à plasma complexe du réacteur  
Wendelstein 7-X, à l'Institut  
Max-Planck de physique  
des plasmas à Greifswald,  
en Allemagne.

© Stefan Sauer/dpa via Alamy



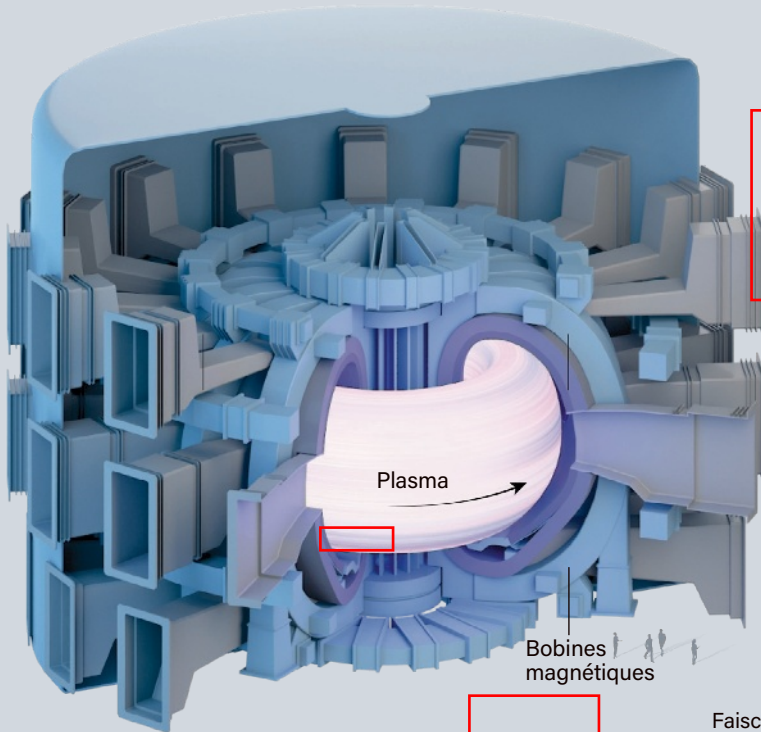
# CINQ MODÈLES DE RÉACTEURS À FUSION

Les entreprises et les gouvernements développent de nombreux types de réacteurs à fusion. Ils chauffent tous du gaz pour créer un plasma, confiné à des températures si élevées que les noyaux atomiques fusionnent, libérant de l'énergie qui peut être exploitée pour produire de l'électricité. Voici cinq modèles importants.

## TOKAMAK

(ITER ET AUTRES INSTALLATIONS)

Des bobines magnétiques supraconductrices – refroidies par de l'hélium liquide – retiennent le plasma dans une cuve toroïdale.



## RÉACTEUR LINÉAIRE (COLLISION DE FAISCEAUX)

(TAE TECHNOLOGIES)

Des paquets de plasma sont projetés dans une chambre centrale et tournent rapidement à l'intérieur d'un solénoïde (électroaimant formé d'une bobine de fil enroulé).

Faisceaux de combustible

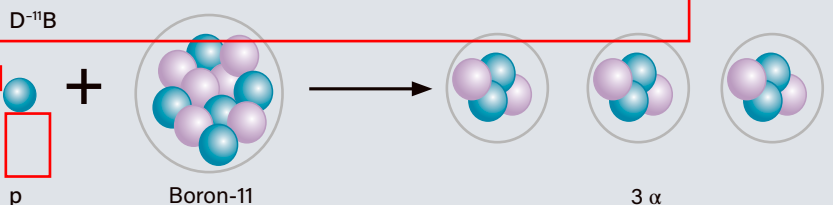
Chambre centrale



## MÉLANGE DE COMBUSTIBLES

De nombreux réacteurs exploitent la fusion du deutérium (D) et du tritium (T) pour libérer de l'énergie. Une réaction de fusion s'amorce entre environ 100 à 15 millions de kelvins. Elle produit des neutrons, qui peuvent rendre la chambre du réacteur radioactive.

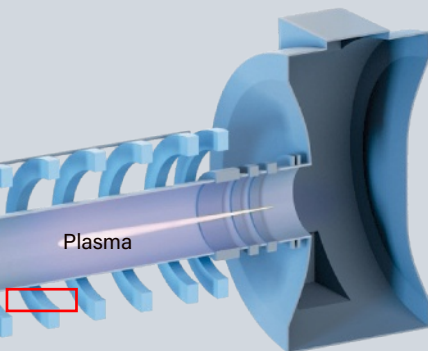
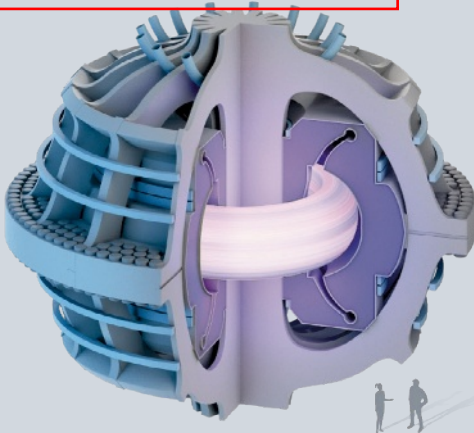
D'autres réactions, comme la fusion des protons (p) avec le bore-11 (11B), ne produisent pas de neutrons, mais l'allumage de la réaction nécessite des températures plus élevées.



## MINI-TOKAMAK

(TOKAMAK ENERGY, COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS ET AUTRES)

Les aimants constitués de supraconducteurs à haute température produisent des champs plus puissants et peuvent être refroidis plus facilement, ce qui permet de construire des tokamaks plus compacts et sphériques.



## FINANCEMENT DE LA FUSION

Les entreprises privées spécialisées dans la fusion ont annoncé plus de 2,4 milliards de dollars (2,16 milliards d'euros) de financement.

TAE Technologies: 880 millions de dollars

Helion Energy: 578 M\$

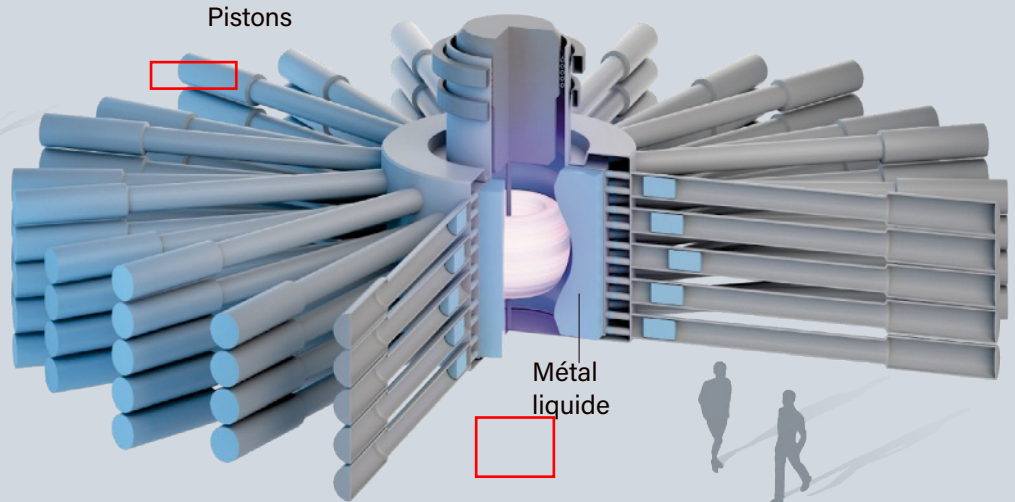
Commonwealth Fusion Systems: 250 M\$

General Fusion: 200 M\$

Tokamak Energy: 200 M\$

Autres (12 entreprises): 302 M\$

Pistons



Métal liquide

## RÉACTEUR À CIBLE MAGNÉTISÉE

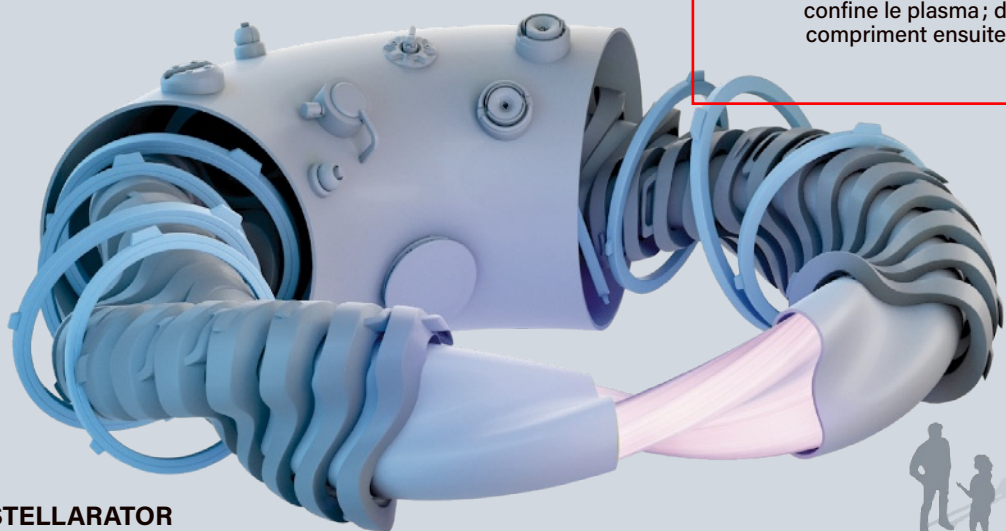
(GENERAL FUSION)

Une boule de métal liquide en rotation confine le plasma; des pistons le compriment ensuite rapidement.

## STELLARATOR

(WENDEL STEIN 7-X)

Des champs magnétiques torsadés en une boucle complexe confinent le plasma.





démonstration à grande échelle adaptée aux centrales électriques», déclare Chris Mowry, directeur général de General Fusion. À moins que ses concurrents ne le devancent.

Conçue par l'architecte britannique Amanda Levete, la centrale prototype de General Fusion illustre bien la façon dont la recherche sur la fusion est passée de projets pharaoniques financés par les États ou la communauté internationale à des projets à plus petite échelle menés par des entreprises privées – avec tout de même souvent avec un soutien public (General Fusion recevra par exemple des financements du gouvernement britannique, mais n'en a pas révélé le montant).

À cet égard, les partisans de la fusion nucléaire estiment que le domaine présente de nombreux parallèles avec l'industrie spatiale. Autrefois confinée aux agences gouvernementales, elle bénéficie aujourd'hui du dynamisme et de l'imagination d'entreprises privées audacieuses. «C'est "le moment Space X" pour la fusion», résume Chris Mowry, en faisant référence à l'entreprise de lanceurs spatiaux d'Elon Musk.

«L'ambiance a clairement changé», déclare Thomas Klinger, spécialiste de la fusion à l'institut Max-Planck de physique des plasmas (IPP) de Greifswald, en Allemagne. «Nous pouvons sentir que nous nous rapprochons», ajoute-t-il. Les investisseurs commencent à entrevoir une perspective de rendement: Google et la banque d'investissement Goldman Sachs font par exemple partie des financeurs de l'entreprise californienne spécialisée dans la fusion TAE Technologies, qui a levé environ 880 millions de dollars (770 millions d'euros). «Les entreprises privées commencent à mettre sur pied des projets à la hauteur de ce que seuls les États pouvaient réaliser jusqu'ici», déclare Bob Mumgaard, directeur général de la société Commonwealth

L'entreprise General Fusion prévoit de construire une centrale de démonstration dès l'année prochaine au Royaume-Uni, à Culham – où réside le centre de recherche britannique sur la fusion. Vue d'artiste.



Fusion Systems (CFS), située à Cambridge, dans le Massachusetts, aux États-Unis.

Et tout comme les voyages spatiaux privés sont en train de se concrétiser, de nombreux spécialistes de l'industrie prévoient que le même modèle économique donnera naissance à la fusion nucléaire commerciale d'ici à une décennie. «Il y a de très bonnes chances d'y arriver en moins de dix ans», estime Michl Binderbauer, directeur général de TAE Technologies. Dans le rapport de la FIA, une majorité des acteurs interrogés pensent que la fusion alimentera un réseau électrique quelque part dans le monde dans les années 2030.

Cependant, plusieurs spécialistes de la fusion nucléaire qui ne travaillent pas pour ces entreprises privées estiment que, bien que les perspectives soient indéniablement excitantes, atteindre la commercialisation aussi rapidement est trop optimiste. «Les entreprises privées disent que cela fonctionnera dans dix ans, mais ce sont juste de belles promesses pour attirer les investisseurs», juge Tony Donné, directeur du programme du consortium Eurofusion, qui regroupe les instituts de recherche sur la fusion de l'Union européenne. «Ces entreprises affirment depuis toujours être à une dizaine d'années d'un réacteur à fusion fonctionnel, et c'est ce qu'elles font encore aujourd'hui.»

## UN RÊVE VIEUX DE SOIXANTE-DIX ANS

Selon Melanie Windridge, physicienne des plasmas, directrice de la communication de la FIA au Royaume-Uni et consultante en communication pour Tokamak Energy, les calendriers annoncés par les entreprises doivent être considérés non pas tant comme des promesses que comme des objectifs motivants. «Je pense que des objectifs audacieux sont nécessaires», dit-elle. Ian Chapman, directeur général de l'Autorité britannique de l'énergie atomique (UKAEA), ajoute que le soutien de l'État sera probablement nécessaire pour construire une centrale à fusion qui alimente réellement le réseau en électricité.

Mais qu'elle provienne de petites entreprises privées, de grands projets nationaux ou internationaux, ou des deux, une technologie de fusion nucléaire exploitable semble enfin se profiler à l'horizon. «Je suis convaincu que cela va se réaliser», déclare Ian Chapman. Chris Kelsall, directeur général de Tokamak Energy, partage cet avis. «Tôt ou tard, le problème va être résolu, et ça va tout changer.»

Selon Thomas Klinger, la fusion nucléaire, à l'origine de l'énergie des étoiles, est «la seule source d'énergie primaire dans l'Univers que nous n'ayons pas encore exploitée.» Depuis que ces réactions de fusion ont été reproduites dans les années 1950 dans les bombes à hydrogène, les scientifiques rêvent de les contrôler pour produire de l'énergie.

Les centrales nucléaires existantes exploitent la fission, c'est-à-dire la désintégration d'atomes lourds comme l'uranium en éléments plus légers, qui dégage de l'énergie. Dans la fusion, ce sont au contraire des noyaux très légers, généralement des isotopes de l'hydrogène, qui s'assemblent pour former des atomes plus lourds, en dégageant une grande énergie. Cela ne peut se produire qu'à des températures et des pressions très élevées.

La plupart des tentatives pour exploiter la fusion dans des réacteurs consistent à chauffer du deutérium (D ou  $^2\text{H}$ ) et du tritium (T ou  $^3\text{H}$ ) – des isotopes de l'hydrogène comportant un proton et respectivement un et deux neutrons – jusqu'à ce qu'ils forment un plasma – un état de la matière constitué d'atomes ionisés et d'autres particules chargées – puis fusionnent en atomes d'hélium (He). Pour ces isotopes, la fusion s'amorce à des températures et des densités plus faibles que pour l'hydrogène normal.

Contrairement à la fission, la fusion ne produit pas en elle-même de déchets radioactifs à vie longue (seuls les neutrons libérés par la réaction peuvent éventuellement être capturés par les matériaux du réacteur et les rendre radioactifs). Elle est également plus sûre que la fission, car elle s'arrête spontanément si le plasma redescend en dessous des seuils critiques de température ou de densité.

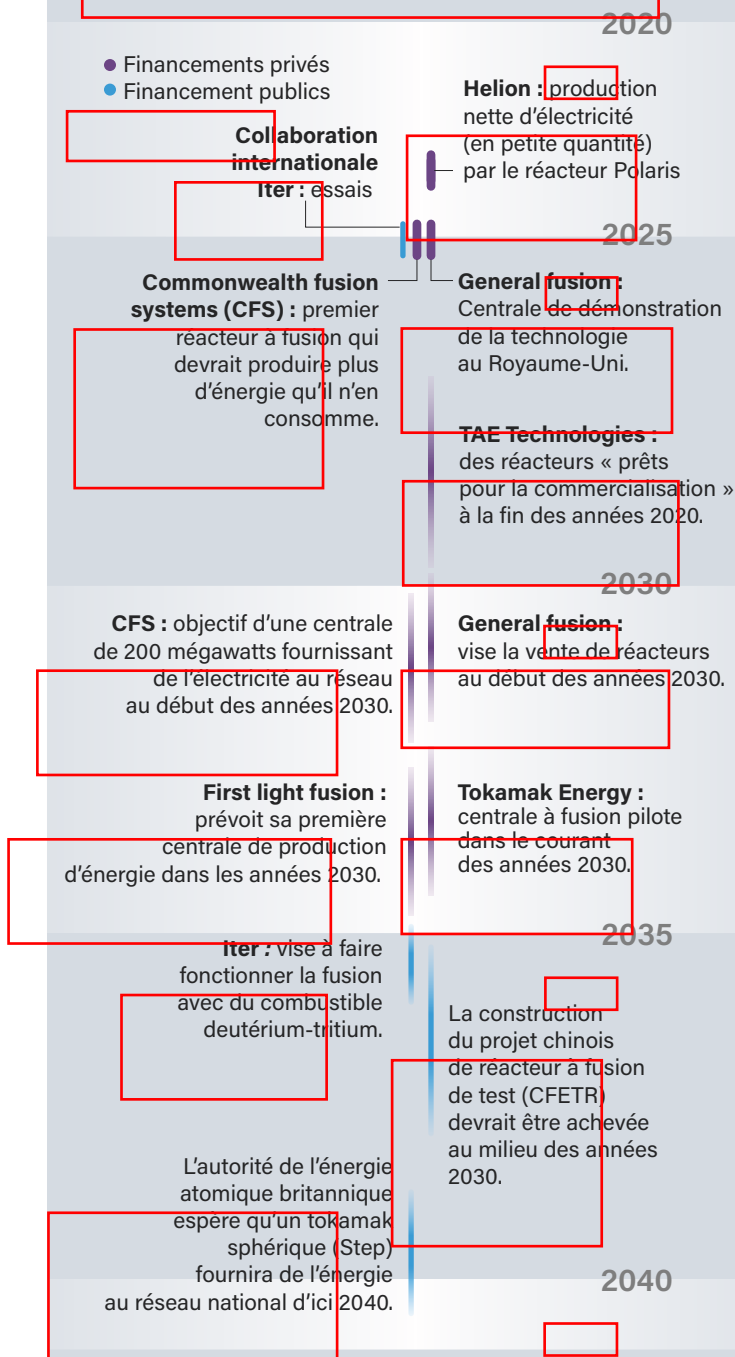
Cependant, ce qui rend la fusion nucléaire si compliquée à contrôler, c'est la difficulté à contenir un plasma chargé électriquement à une température d'environ 100 millions de kelvins – bien plus chaude que le centre du Soleil – pour que la fusion puisse se dérouler. En général, les physiciens utilisent des champs magnétiques pour confiner et faire léviter le plasma à l'intérieur du réacteur. Mais les instabilités dans ce fluide chargé rendent son confinement très difficile. Jusqu'à présent, on n'a jamais réussi à maintenir une réaction de fusion suffisamment longtemps pour en extraire plus d'énergie qu'on en avait injecté pour la déclencher.

Il s'agit nécessairement d'expériences de grande envergure et, jusqu'à récemment, seuls les projets publics pouvaient rassembler les ressources nécessaires. L'ampleur de cette entreprise se reflète aujourd'hui dans le plus grand projet de réacteur à fusion du monde: *Iter* (pour Réacteur thermonucléaire expérimental international). Ce réacteur en cours de construction sur le site de Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône, est financé par trente-cinq pays, dont la Chine, les membres de l'Union européenne, les États-Unis, la Russie, la Corée du Sud et le Japon. Son coût s'élève à au moins 20 milliards d'euros.

Bien que les premiers essais d'*Iter* aient été initialement prévus pour 2025, la fusion D-T complète n'est pas programmée pour avant 2035. L'objectif final est d'extraire en continu du réacteur une puissance de 500 mégawatts (MW)

## Promesses d'avenir

Les entreprises privées font des promesses pour le moins audacieuses sur une possible commercialisation de leurs réacteurs à fusion au cours des années 2030.





– comparable à celle d'une centrale électrique au charbon de taille moyenne – tout en y injectant 50 MW (ces chiffres ne concernent que l'énergie injectée directement dans le plasma et extraite de celui-ci; ils ne tiennent pas compte d'autres processus comme la maintenance des systèmes ou les pertes lors de la conversion de la chaleur en électricité).

Une autre série de grands réacteurs pourrait succéder à *Iter*: la Chine, dont trois petits réacteurs à fusion alimentent *Iter* en données, prévoit de construire durant la prochaine décennie un grand réacteur à fusion d'essai (China Fusion Engineering Testing Reactor, ou CFETR), tandis que la Corée du Sud et l'Union européenne proposent de construire des centrales de démonstration qui prendraient la suite d'*Iter*.

Ces grands projets nationaux et internationaux ne seront pas prêts à temps pour produire l'énergie décarbonée nécessaire à la lutte contre le changement climatique, même si la fusion devrait devenir un élément clé de l'économie de l'énergie dans la seconde moitié du siècle. Mais les entreprises privées espèrent obtenir plus tôt des réacteurs à fusion fonctionnels et abordables.

Comme dans le cas de l'exploration spatiale, l'un des avantages d'un secteur privé de la fusion est d'offrir une plus grande diversité d'approches que celle des seuls projets publics monolithiques.

*Iter* utilise l'approche la plus courante pour confiner le plasma: un tokamak. Ce dispositif maintient le plasma dans une chambre toroïdale (en forme d'anneau) à l'aide de puissants aimants supraconducteurs. Le flux des particules du plasma, chargées électriquement, engendre également un champ magnétique qui contribue à le confiner.

Mais le tokamak n'est pas la seule option. Aux débuts de la fusion, dans les années 1950, l'astrophysicien américain Lyman Spitzer a montré que les champs magnétiques pouvaient être configurés en une boucle torsadée pour former une «bouteille magnétique» qui pouvait être remplie de plasma. Cette conception est connue sous le nom de «stellarator». Mais la résolution des équations décrivant le plasma pour cette géométrie complexe était trop exigeante en termes de calculs, si bien que le concept a été abandonné une fois qu'il a été démontré que les tokamaks fonctionnaient.

Toutefois, avec l'accroissement de la puissance de calcul à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, les chercheurs ont réexaminé l'idée. C'est ainsi qu'est né un projet de stellarator à l'institut Max-Planck de physique des plasmas, le réacteur Wendelstein 7-X. D'un coût de construction et d'opération de plus de 1 milliard d'euros, le réacteur Wendelstein 7-X a effectué son premier essai de fusion en 2015 et sera totalement achevé d'ici à la fin de l'année. Viendra



ensuite un long processus pour déterminer comment l'exploiter couramment en tant que démonstrateur.

Selon Josefine Proll, physicienne spécialiste de la fusion à l'université de technologie d'Eindhoven, aux Pays-Bas, les stellarators présentent l'avantage de confiner plus facilement le plasma, sans qu'il soit nécessaire, comme c'est le cas dans les tokamaks, d'y faire circuler de puissants courants électriques pour limiter les instabilités. Mais il n'est pas certain qu'il soit possible de mettre en œuvre la technologie du stellarator dans un réacteur d'ici à vingt ou trente ans. «Cela ne semble pas du tout probable à l'heure actuelle», estime-t-elle. «Nous devons encore répondre à beaucoup de questions fondamentales, déclare Thomas Klinger. Il s'agit d'une machine unique en son genre, il faut donc être patient et avancer pas à pas.» Selon lui, les entreprises privées se fixent des objectifs à plus court terme parce qu'elles doivent satisfaire leurs investisseurs, mais cela ne signifie pas qu'elles pourront tenir leurs promesses.

Un technicien travaille à l'intérieur (à droite) du réacteur de fusion de démonstration «Norman» de TAE Technologies (à gauche), dont le concept s'inspire des accélérateurs de particules.

## DES CONCEPTIONS ALTERNATIVES

Certaines entreprises de fusion privées s'en tiennent à la conception du tokamak, mais à une échelle réduite. Chez Tokamak Energy, une équipe d'environ 165 personnes travaille sur un tokamak sphérique, ressemblant à une pomme au trognon évidé. Avec ses 3,5 mètres de diamètre, il sera beaucoup plus petit que le tokamak *Iter*, qui, avec les dispositifs de refroidissement qui l'entourent, mesurera près de 30 mètres de largeur et de hauteur. Certains projets publics envisagent également cette conception



sphérique compacte: l'agence de l'énergie atomique britannique, par exemple, a lancé un projet appelé *Step* (*Spherical tokamak for energy production*), qui vise à construire un tel dispositif dans une centrale prototype qui fournirait au moins 100 MW au réseau électrique national d'ici à 2040. L'agence a présélectionné cinq sites pour accueillir la centrale, et le choix final devrait être fait l'année prochaine.

La clé de cette conception sphérique réside dans de nouveaux types d'aimants fabriqués à partir de rubans de matériaux supraconducteurs à haute température, qui devraient produire des champs beaucoup plus puissants que les aimants supraconducteurs classiques utilisés par *Iter*. Selon Thomas Klinger, ces aimants «pourraient changer la donne», non seulement en raison des champs plus puissants qu'ils induisent, mais aussi parce qu'ils sont plus faciles à refroidir. Les supraconducteurs classiques doivent être refroidis à l'hélium liquide, ce qui est un cauchemar pour les ingénieurs: la viscosité de l'hélium liquide étant presque nulle, il s'échappe par la moindre petite fissure. Les supraconducteurs à haute température, en revanche, peuvent être refroidis avec de l'azote liquide, qui est bon marché et facile à stocker.

Tokamak Energy (en collaboration avec le Cern, le laboratoire européen de physique des particules situé près de Genève, en Suisse) et Commonwealth Fusion Systems misent tous deux sur ces nouveaux aimants. En août, cette dernière entreprise a annoncé qu'elle avait fabriqué ces aimants dans la forme requise pour ses tokamaks «dans les délais et le budget prévus», selon Bob Mumgaard.

En 2018, Commonwealth Fusion Systems a été fondée au Centre pour la science des plasmas et la fusion de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Thomas Klinger considère l'entreprise comme «le projet de fusion privé le plus prometteur, le plus valable et le plus réfléchi.» Le MIT et Commonwealth Fusion System se préparent à construire ce que Bob Mumgaard appelle «le premier réacteur à fusion producteur net d'énergie», c'est-à-dire qui produira plus d'énergie qu'il n'en consomme. Baptisée Sparc, cette machine est en cours de construction à Devens, dans le Massachusetts. Selon Bob Mumgaard, elle sera opérationnelle d'ici à fin 2025 et sera «commerciallement pertinente» car elle fournira une énergie d'environ 100 MW.

First Light Fusion, une société fondée en 2011 à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, poursuit une stratégie différente, appelée «confinement inertiel». Dans cette approche, le plasma n'est pas confiné par des champs magnétiques: il est comprimé par une onde de choc jusqu'à atteindre la densité gigantesque nécessaire à la fusion, et ne reste dans cet état qu'une fraction de seconde par sa seule inertie, avant de se disperser et de dissiper son énergie.

Cette idée, proposée dès les années 1950, est également étudiée au National Ignition Facility (NIF), du laboratoire Lawrence Livermore, en Californie. Des capsules de plastique de la taille d'un petit pois contenant du combustible D-T sont comprimées par des impulsions laser de quelques nanosecondes pour déclencher la fusion. En août 2021, le National Ignition Facility a annoncé avoir obtenu une brève libération d'énergie huit fois supérieure à ses tentatives précédentes, équivalente à 70% de l'énergie utilisée pour provoquer la réaction [le 27 janvier 2022, les équipes du National Ignition Facility ont annoncé avoir réussi à atteindre un état de plasma «en combustion», où la chaleur engendrée par les réactions de fusion au sein du plasma excède l'énergie extérieure injectée, ndlr]. Ces résultats ont relancé l'espoir de parvenir à un gain net avec la fusion à confinement inertiel, bien qu'un processus aussi énergivore puisse en fin de compte se révéler plus utile pour la recherche fondamentale que pour la production d'énergie à grande échelle.

Chez First Light, l'onde de choc qui comprime le plasma n'est pas créée par des lasers gourmands en énergie, mais par un canon à projectiles électromagnétiques qui tire un petit morceau de matériau sur une cible contenant les isotopes d'hydrogène. L'entreprise garde secrets les détails de ce processus, mais a déclaré que pour parvenir à la fusion, elle devra réussir à envoyer le projectile à 50 kilomètres par seconde, soit le double de ce qui est en général atteint dans les expériences d'ondes de choc actuelles.



General Fusion adopte encore une autre stratégie, nommée « fusion par cible magnétisée ». Cela consiste à comprimer le plasma plus lentement, par exemple à l'aide de pistons, mais avec l'aide d'un confinement magnétique qui empêche la chaleur de se dissiper lorsque le plasma est comprimé. Cette idée, suggérée au début des années 1970 par des chercheurs du laboratoire de recherche navale américain, vise à trouver un compromis entre l'utilisation de champs magnétiques intenses et donc énergivores nécessaires pour confiner le plasma dans un tokamak, et celle d'ondes de choc (provoquées par des lasers ou autres), également gourmandes en énergie, pour comprimer rapidement le plasma dans le confinement inertiel.

La conception du réacteur de General Fusion à Culham utilise ainsi une centrifugeuse pour faire tourner une chambre remplie de plomb et de lithium fondus. Ce mouvement ouvre une cavité dans le métal liquide, où est injecté le plasma. Un système de pistons injecte un surplus de métal liquide dans la chambre, comprimant le plasma pendant quelques dizaines de milli-secondes. La fusion s'amorce, puis la pression est relâchée et le processus est répété par impulsions successives environ une fois par seconde.

Un aspect particulièrement intéressant de ce réacteur est qu'il produit du tritium, une ressource extrêmement coûteuse qui ne peut elle-même être fabriquée que par des réactions nucléaires (typiquement, par un flux de neutrons percutant du lithium) et qui se désintègre rapidement (sa demi-vie est de 12,3 ans). Dans le réacteur *Iter* et dans d'autres modèles, du tritium peut être produit lorsque des neutrons s'échappant du réacteur frappent une couche de lithium recouvrant le tokamak. Mais dans la conception de General Fusion, le tritium est fabriqué lorsque les neutrons percutent le lithium au sein même du mélange de métal liquide qui sert pour la compression.

Au cours des dernières années, General Fusion a franchi des obstacles majeurs dans son approche : fabriquer une cible de plasma qui tienne suffisamment longtemps pour être comprimée, et faire s'effondrer rapidement mais de façon bien contrôlée la cavité de métal liquide. L'entreprise affirme avec confiance qu'une fois que sa centrale de démonstration sera opérationnelle en 2025, elle « alimentera les foyers, les entreprises et l'industrie avec une énergie de fusion nucléaire propre, fiable et abordable au début des années 2030 ».

L'entreprise TAE Technologies a choisi un concept à certains égards encore plus audacieux. Elle prévoit d'abandonner le combustible D-T au profit des atomes de bore 11 et des noyaux d'hydrogène (c'est-à-dire des protons). Cette idée, défendue par le cofondateur de TAE, le physicien canadien Norman Rostoker, et baptisée



« fusion p-<sup>11</sup>B », nécessite des températures dix fois supérieures à celles de la fusion D-T : environ un milliard de kelvins ! L'avantage est que cette réaction n'utilise que du combustible disponible en abondance, et ne produit pas de neutrons qui pourraient contaminer le réacteur. Selon Michl Binderbauer, ce concept permettrait de réduire les coûts de maintenance et d'atteindre un objectif beaucoup plus durable.

Dans la conception de réacteur de TAE Technologies, le plasma est confiné à l'intérieur d'un champ magnétique cylindrique créé par un solénoïde – une approche qui s'inspire des accélérateurs de particules. Le plasma tourne autour de l'axe du réacteur, et cette rotation, comme dans une toupie, assure une stabilité inhérente. Le confinement ne nécessite pas de puissants champs magnétiques externes ; ceux-ci sont pour l'essentiel engendrés par le plasma en rotation lui-même. Pour le maintenir en rotation, des faisceaux tangentiels d'atomes de bore injectent du moment angulaire.

TAE Technologies a fabriqué des prototypes pour démontrer la pertinence de cette conception. Depuis 2017, la société travaille avec un système de test nommé Norman, et elle commence aujourd'hui à travailler sur un dispositif appelé Copernicus, qui fonctionnera avec un plasma d'hydrogène normal pour éviter de produire des neutrons. Des simulations par ordinateur montreront quelle énergie pourrait être produite avec un véritable combustible adapté à la fusion. Si TAE Technologies parvient à atteindre les conditions nécessaires à la fusion D-T – ce qu'elle espère réussir d'ici au milieu de la décennie –, elle prévoit d'accorder une licence d'exploitation de sa technologie à d'autres équipes travaillant avec ce

L'aimant supraconducteur à haute température le plus puissant du monde sera utilisé dans le réacteur à fusion Sparc, de la société Commonwealth Fusion Systems et de l'institut de Technologie du Massachusetts (MIT), d'ici à 2025.



# L'industrie privée dans le domaine de la fusion s'appuie sur des années d'investissements publics dans des projets comme «Iter»

combustible. Michl Binderbauer considère pour sa part Copernicus comme un «tremplin» vers les températures nécessaires à la fusion  $p^{-11}B$ . «Nous sommes convaincus que nous pouvons atteindre le milliard de degrés d'ici à la fin de la décennie», affirme-t-il.

## DES RÉACTEURS MOINS CHERS?

Parmi les nombreuses autres entreprises privées qui se sont lancées dans la fusion, Helion Energy, à Everett, dans l'État de Washington, est celle qui a suscité le plus d'intérêt de la part des investisseurs: début 2021, elle a annoncé avoir récolté 500 millions de dollars, portant son budget total à 578 millions de dollars (505 millions d'euros). Son objectif est de produire de l'électricité directement à partir de la fusion, plutôt que d'utiliser la chaleur dégagée par celle-ci pour vaporiser un fluide et actionner des turbines. La technique de Helion Energy consiste à envoyer des impulsions de plasma dans un réacteur linéaire, puis à comprimer rapidement ce plasma regroupé à l'aide de champs magnétiques. Lorsque la fusion se produit, le plasma se dilate et son champ magnétique interagit avec celui qui entoure le réacteur pour induire un courant électrique. Helion Energy espère réussir à faire fonctionner un mélange de deutérium et d'hélium 3, un processus qui ne créerait pas de neutrons en sous-produit. Mais l'hélium 3 lui-même devrait être produit par la fusion deutérium-deutérium... L'entreprise construit actuellement un réacteur de démonstration appelé Polaris, qu'elle souhaite mettre en service d'ici à 2024.

Les réacteurs construits par les entreprises privées, plus petits que les projets à l'échelle d'Iter, seront beaucoup plus abordables. Le

Cet article est une traduction de **The chase for fusion energy**, publié le 17 novembre 2021 sur Nature.com.

## BIBLIOGRAPHIE

M. Barbarino, **On the brink of a new era in nuclear fusion R&D**, *Nature Reviews Physics*, 2022

A. Turrell, **The star builders: Nuclear fusion and the race to power the planet**, Scribner, 2021

P. Bertrand, **Iter, un passage obligé**, *Pour la Science*, n° 334, 2005

cofondateur de Tokamak Energy, David Kingham, envisage des dispositifs à 1 milliard de dollars, et Michl Binderbauer pense que les machines de TAE technologies pourraient même être construites pour environ 250 millions de dollars.

L'objectif est de fabriquer de petits réacteurs à fusion compatibles avec les réseaux électriques existants. Selon Chris Kelsall (le directeur général de Tokamak Energy), ils pourraient également servir directement aux industries particulièrement gourmandes en énergie, comme la métallurgie, un secteur qui pourra difficilement être alimenté par les énergies renouvelables. Chris Mowry ajoute que le transport maritime pourrait constituer un autre marché important: les dispositifs produisant environ 100 MW ont «la taille idéale pour un grand porte-conteneurs».

Tony Donné, du consortium Eurofusion, reste toutefois prudent quant à ces perspectives, affirmant que les entreprises privées «annoncent des délais très resserrés par rapport aux projets financés par le secteur public, mais présentent également un risque d'échec beaucoup plus élevé». Pour autant, TAE Technologies insiste sur le fait qu'elle est toujours sur la trajectoire annoncée au milieu des années 2010, à savoir mettre au point un réacteur à fusion commercialisable vers la fin de cette décennie.

Malgré son scepticisme, Tony Donné ajoute qu'il «considère l'essor des entreprises privées dans le domaine de la fusion comme un bon signe. Il peut y avoir des avantages mutuels à maintenir des liens étroits entre les projets de fusion publics et privés.» C'est en tout cas ce qui se passe. Non seulement l'industrie privée de la fusion s'appuie sur des années d'investissements publics dans des projets tels qu'Iter, mais elle bénéficie également de l'intérêt des gouvernements – c'est pourquoi le gouvernement britannique et le ministère américain de l'Énergie investissent également dans des entreprises comme Tokamak Energy, Commonwealth Fusion Systems et General Fusion. Chris Mowry pense que ces partenariats entre public et privé sont la voie à suivre – comme ils l'ont été pour les vaccins contre le Covid-19. Et, comme les vaccins, la fusion sera nécessaire dans le monde entier, d'autant plus que la consommation d'énergie va augmenter dans les pays à faible revenu.

La mise au point des vaccins contre le Covid-19 a montré «ce que l'on peut réaliser si l'on dispose des ressources nécessaires», déclare Melanie Windridge. Si nous avions ce genre de mobilisation dans le domaine de l'énergie, ce qu'on pourrait réaliser serait incroyable». Le monde a désespérément besoin de davantage de sources d'énergie propres et décarbonées. «C'est un défi existentiel, déclare Chris Mowry. La fusion est en quelque sorte le vaccin contre le changement climatique.» ■



**ALAIN BÉCOULET**

est physicien et spécialiste  
de la fusion nucléaire.

Il est responsable du domaine  
ingénierie du projet *Iter* depuis  
février 2020. Il a été directeur  
de recherche au CEA  
et notamment directeur de l'IRFM,  
l'Institut de recherche sur la fusion  
par confinement magnétique.



# Le défi «Iter» était hors norme, mais nous touchons au but

Des résultats expérimentaux récents  
et encourageants, des projets de firmes privées  
qui se multiplient... et «Iter»? L'imposant réacteur  
international en cours d'assemblage profite  
de ces avancées. Alain Bécoulet est confiant:  
la première fusion est prévue pour 2035.

**Face au changement climatique, la question de l'énergie occupe une place centrale dans les débats actuels. Énergies renouvelables, fission nucléaire... les pistes sont nombreuses. L'une d'elles, la fusion nucléaire, est particulièrement ambitieuse et doit encore faire la démonstration de ses performances. L'installation d'Iter, en cours de construction, cristallise autour d'elle une forte attente aussi bien des acteurs du secteur, chercheurs et industriels, que du grand public. Quel est le principe de cette source d'énergie ?**

L'idée principale est de mimer ce qui se passe dans le Soleil, sans en reproduire exactement les mêmes conditions. Une étoile est une boule de plasma (un état de la matière où les atomes sont totalement ionisés) qui sous l'effet de sa propre masse crée des conditions de pression et de température très élevées en son cœur. Ces conditions sont suffisantes pour amorcer et soutenir des réactions de fusion nucléaire. Typiquement, des noyaux d'hydrogène se lient pour donner de l'hélium. Ce processus libère de l'énergie, celle qui fait briller les étoiles.

Le principe de la fusion est d'une certaine façon l'inverse d'une fission nucléaire qui part de gros atomes que l'on scinde en deux, ce qui libère également de l'énergie.

#### **Comment reproduire ces processus de fusion en laboratoire ?**

Sur Terre, nous voulons réaliser ces réactions de fusion dans un plasma à petite échelle. Le rapport de volume entre le Soleil et celui d'un réacteur correspond à une réduction de 24 ordres de grandeur ! Évidemment, il est impossible de reproduire des conditions de pression comparables à celles qui existent au centre du Soleil. Or il est nécessaire pour faire fusionner deux noyaux atomiques de vaincre la répulsion coulombienne qui s'exerce entre eux, car ils sont tous deux chargés positivement. La solution est de leur donner une vitesse élevée en augmentant la température. Ainsi, deux noyaux peuvent se rapprocher assez l'un de l'autre de sorte que l'interaction forte (celle qui lie entre eux les constituants d'un noyau) prend le dessus et conduit à leur fusion.

Les travaux de recherche en physique nucléaire montrent que la réaction la plus simple à réaliser en laboratoire (c'est-à-dire avec une probabilité de réaction élevée) est celle du deutérium et du tritium, deux isotopes de l'hydrogène comportant respectivement un et deux neutrons. Lors de leur fusion, ils produisent un noyau d'hélium et émettent un neutron. Avec des densités de plasma de l'ordre de  $10^{20}$  particules par mètre cube (la densité de l'air est de  $2 \times 10^{25}$  particules par mètre cube, et  $3,3 \times 10^{28}$  particules par mètre cube pour l'eau à pression et température ordinaires), les températures requises sont de l'ordre de 150 millions

de degrés, soit dix fois celle qui règne au cœur du Soleil ! Aucun matériau ne peut résister au contact d'un plasma d'une telle température.

#### **Quelles sont les solutions ?**

Il existe deux approches. La fusion inertielle consiste à mettre les réactifs dans de petites capsules que l'on fait imploder en les frappant simultanément avec plusieurs lasers de haute puissance. L'autre piste est celle du confinement magnétique. On crée une « boîte » aux parois immatérielles à l'aide d'un champ magnétique. Comme les particules du plasma (noyaux et électrons) sont toutes chargées, elles décrivent des trajectoires hélicoïdales qui suivent les lignes du champ magnétique. Avec une géométrie du champ adaptée, le plasma reste confiné dans cette boîte magnétique. Il est possible de concevoir ce piège immatériel de sorte à empêcher le plasma d'entrer en contact avec les parois de l'enceinte du réacteur.

Différentes solutions de confinements magnétiques ont été imaginées depuis les années 1950. Le principe du tokamak a été forgé en Union soviétique par plusieurs physiciens, dont les deux Prix Nobel Igor Tamm et Andreï Sakharov. Le terme « tokamak » est un acronyme en russe signifiant « chambre toroïdale avec bobines magnétiques ». La configuration en est, à première vue, assez simple. La chambre forme un tore (similaire à une bouée ou un donut) et des aimants verticaux entourant la section de la chambre forment le champ magnétique dont les lignes de champ dessinent des cercles horizontaux dans l'enceinte du tore. Le premier tokamak soviétique opère dès 1958.

#### **Les tokamaks ont donc déjà une histoire qui s'étend sur plus de soixante ans ; quelles ont été les grandes étapes de leur développement ?**

Dans les années 1960 et 1970, les premiers prototypes ont permis aux physiciens de se familiariser avec le contrôle de ces champs magnétiques et d'y confiner un plasma. C'est une physique complexe contrôlée par les équations de Maxwell, pour le champ magnétique, et les équations de Vlassov, pour le plasma, qui se comporte comme un fluide présentant des propriétés magnétiques. Trouver les bons paramètres pour obtenir un régime stable afin de confiner le plasma le plus longtemps possible dans l'enceinte est l'un des grands défis dans ce domaine de recherche.

Après cette première phase exploratoire, une stratégie globale a été mise en place à partir des années 1980. Les différents tokamaks construits dans le monde ont été conçus pour se concentrer sur certains aspects particuliers du problème. Par exemple, *Jet* (le *Joint European Torus*), au Royaume-Uni, s'intéresse tout particulièrement à la physique du plasma, et à la

#### **QUELQUES DATES**

**1958**

L'Union soviétique construit T1, le premier tokamak.

**1968**

Le tokamak soviétique T3 bat des records de température et de temps de confinement.

**1973**

Le premier tokamak français TFR, à Fontenay-aux-Roses, est opérationnel.

**1983**

Premier plasma du tokamak européen Jet.

**1988**

Tore Supra entre en activité en France.

**1988**

Acte de naissance du projet international *Iter*.

**2013**

La construction du bâtiment d'*Iter* débute.



performance en matière de puissance de fusion. En France, *Tore Supra*, devenu *West* après une vaste campagne d'améliorations, a un programme complémentaire et plus technologique avec l'utilisation d'aimants supraconducteurs et de composants du tokamak capables d'encaisser en continu la forte chaleur produite par le plasma. L'avantage des aimants supraconducteurs est évident. Pour confiner le plasma, il faut des champs magnétiques intenses, or les aimants conventionnels chauffent par effet Joule (les électrons qui y circulent entrent en collision avec les atomes et libèrent de l'énergie sous forme de chaleur) et ne peuvent donc maintenir un courant élevé très longtemps. Certains matériaux, quand ils sont refroidis à des températures proches du zéro absolu (environ  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), deviennent supraconducteurs, et les électrons circulent avec une résistance nulle. Il n'y a plus d'effet Joule. Il est alors possible d'y faire circuler un courant électrique plus important pour avoir un champ magnétique plus intense et de le maintenir plus longtemps.

Les résultats obtenus par ces différentes expériences (citons aussi *Doublet III-D*, aux États-Unis, ou *Asdex-Upgrade*, en Allemagne) ont permis d'optimiser la conception de la génération suivante de tokamaks, représentée par *Iter*, pour atteindre le meilleur rendement possible.

#### Comment définit-on le rendement ?

Ce paramètre est souvent source de confusion dans la communication auprès du grand public. Le rendement ultime ou commercial, celui qui aura de l'importance lorsque nous en serons au stade de la commercialisation est le rendement « de la prise à la prise ». Il faut bien voir qu'un réacteur à fusion est avant tout un amplificateur de puissance, ce qui n'est pas le cas d'un réacteur à fission. Dans ce dernier, on met de la matière, l'uranium par exemple, et on récupère de l'énergie. Dans une centrale à fusion, il est nécessaire d'injecter de l'énergie et de la matière pour obtenir une plus grande quantité d'énergie. L'énergie injectée sert à chauffer le plasma, mais il faut aussi de l'énergie pour alimenter les aimants, pour refroidir ces derniers, etc. Il y a donc bien une notion de rendement dans les réacteurs à fusion : c'est le rapport de la puissance électrique produite et de la puissance consommée par la centrale.

Quand on aura des réacteurs commerciaux, on prendra par exemple 100 mégawatts sur le réseau et on y restituera 1000 mégawatts. On aura alors un rendement commercial de 10. Mais les tokamaks actuels, et c'est aussi le cas de celui d'*Iter*, sont des installations de recherche, au moins une étape avant la commercialisation. Le réacteur d'*Iter* ne sera pas connecté à des turbines, entraînées par de la

vapeur d'eau chauffée à partir de l'énergie extraite du plasma, pour produire de l'électricité. On s'intéresse donc au « rendement plasma », qui est simplement le rapport de la puissance produite à celle injectée dans le plasma pour le chauffer.

L'objectif d'*Iter* est d'atteindre un rendement plasma de l'ordre de 10. Son second objectif est de montrer que le dispositif peut maintenir un plasma pendant de longues périodes, puisque à terme une centrale devra tourner pendant des jours sans interruption.

#### Alors qu'*Iter* n'est pas encore opérationnel, plusieurs résultats dans le domaine de la fusion ont été annoncés ces derniers mois. De quoi s'agit-il ?

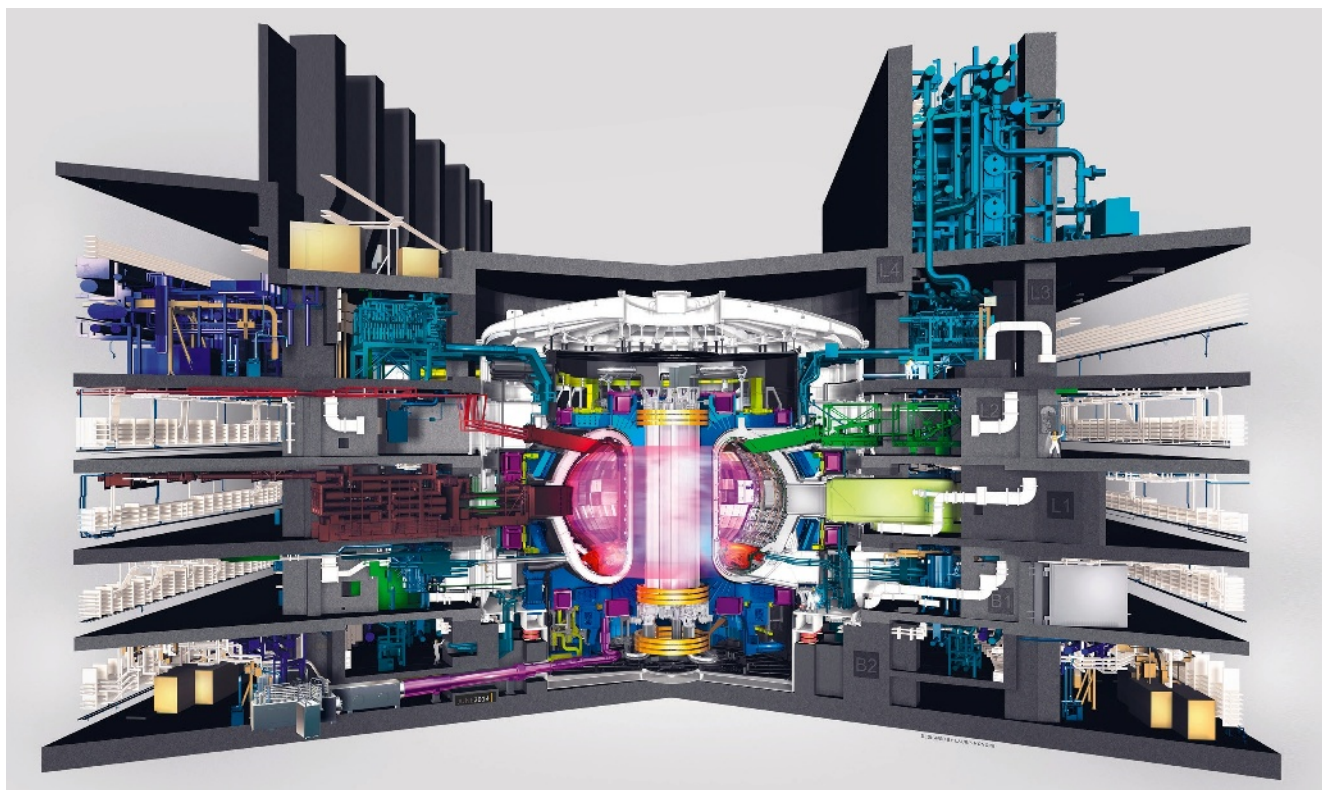
Avant de parler des tokamaks, commençons par saluer le résultat du NIF, l'organisme de fusion inertielle américain. En août 2021, l'installation située au laboratoire Lawrence-Livermore, en Californie, a atteint un « rendement plasma » de 70 % en produisant 1,3 mégajoule en quatre milliardièmes de seconde. La fusion inertielle se confronte à des défis techniques très différents des tokamaks et c'est enthousiasmant de voir que cette piste avance aussi.

Les tokamaks ne sont pas en reste. En 1997, *Jet* avait établi un record de 16 mégawatts pendant 0,15 seconde et avec un rendement proche de 100%. En août 2021, le même réacteur a maintenu une puissance de 10 mégawatts, mais pendant 5 secondes. Cela a permis une production d'énergie record de 59 mégajoules (qui correspond au produit de la puissance par la durée). Comme l'énergie injectée dans le plasma pour le chauffer était de l'ordre de 200 mégajoules, on a un rendement record de 25%.

Le tokamak *Jet* ne peut pas maintenir ce régime plus longtemps pour des raisons techniques. Il n'est pas équipé d'aimants supraconducteurs et il n'a pas de systèmes de refroidissement assez efficaces pour évacuer l'énergie produite. Mais c'est là que le résultat du tokamak chinois *East* (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*) est encourageant. En fin d'année 2021, le dispositif a maintenu un plasma à environ 70 millions de degrés pendant 1056 secondes, soit plus de 17 minutes. Il bat ainsi le record jusque-là détenu par *Tore Supra* de 390 secondes en 2003. Cette performance est une belle démonstration de la synergie mondiale. Les aimants d'*East* ont bénéficié d'un transfert de technologie en provenance de *Tore Supra*. Les équipes d'*East* ont amélioré le concept et les résultats sont au rendez-vous.

Évidemment, si on regardait le rendement d'*East*, il serait extrêmement faible, mais ce n'était pas l'objectif de cette expérience. C'est cette répartition des problèmes à traiter entre les différents tokamaks qui nous permet de conclure

On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, « Iter », entourée d'une myriade de projets plus modestes



que le faisceau récent d'avancées est de bon augure pour *Iter*, dont la conception est une sorte de synthèse de ces diverses expériences. Et, par ailleurs, ces dernières expériences continuent de nous apporter des informations pour optimiser encore la configuration d'*Iter*.

#### **Venons-en donc à *Iter*.**

##### **Quand le projet a-t-il débuté ?**

*Iter* est l'acronyme anglais pour «réacteur thermonucléaire expérimental international» et signifie «chemin» en latin. Il associe 35 pays : les pays de l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Chine, la Russie, la Corée du Sud, les États-Unis, la Suisse et le Royaume-Uni. Le projet a été discuté dès 1985, notamment lors d'une rencontre entre le président américain Ronald Reagan et le dirigeant soviétique Mikhaïl Gorbatchev. L'acte de naissance est signé en 1988. Une longue phase de conception s'ensuit et s'étend sur plusieurs années. En 2005, le site de Cadarache, dans le sud de la France, est officiellement retenu pour accueillir le réacteur.

La construction du bâtiment du tokamak a commencé en 2013. Actuellement, la structure en béton est terminée, une partie des systèmes cryogéniques, électriques et de refroidissement sont en place. L'assemblage de la machine a démarré. Ce projet est souvent comparé au programme *Apollo*, de la Nasa, par son envergure et sa complexité. Près de cinquante entreprises sont impliquées dans sa construction. Les pièces du tokamak sont

**Schéma du tokamak d'*Iter*.**  
En mauve, l'anneau de plasma dans la chambre à vide. La machine et son cryostat pèsent 23 000 tonnes, soit l'équivalent de 3,5 fois la masse de la tour Eiffel.

fabriquées dans différents pays (Corée du Sud, Japon, Italie...) et doivent être transportées sur place. Il faut gérer ce puzzle tridimensionnel avec un chantier qui s'étend sur plus de dix ans. D'un point de vue technique, la machine repose sur des technologies de pointe : on parlait de la cryogénie, mais c'est aussi le cas pour le contrôle du plasma, son chauffage, la qualité des matériaux, etc.

##### **Quelles sont les dimensions du dispositif d'*Iter* ?**

Le réacteur est intégré dans un complexe de trois bâtiments sur une hauteur de 60 mètres et une largeur de 120 mètres. Le tokamak en lui-même est composé de différentes parties. La chambre à vide toroïdale pèse près de 5 000 tonnes pour un diamètre externe de 19,4 mètres et un rayon interne de 6,5 mètres. La hauteur maximale est de 11,3 mètres. La chambre peut accueillir 800 mètres cubes de plasma.

Il faut ajouter trois systèmes d'aimants. Les 18 aimants toroïdaux verticaux s'enroulent autour de la chambre à vide. Ils produisent les lignes de champ qui confinent le plasma avec un champ magnétique qui s'élève à 5,3 teslas dans le plasma. Cependant, avec ce seul champ, on constate que les particules du plasma subissent une déviation verticale. La courbure du champ magnétique exerce une sorte de force «centrifuge» : les électrons partent dans une direction et les noyaux dans l'autre. Cette séparation des charges conduit à une perte rapide du confinement. Le problème a été



résolu par les chercheurs soviétiques dans les années 1950. Un solénoïde de 18 mètres de hauteur pour 4,3 mètres de diamètre et un poids de 1 000 tonnes passe par l'axe central du tore: il crée un courant induit qui circule dans le plasma et s'oppose à la dérive des particules.

Pour compléter le dispositif, six aimants dits « poloïdaux » entourent l'ensemble dans le plan horizontal. Les plus grands (24 mètres de diamètre) ont dû être construits sur place. Leur rôle est de déformer le plasma pour éviter qu'il n'entre en contact avec l'enceinte et d'améliorer sa stabilité.

Le plasma n'en reste pas moins un milieu très instable où peuvent naître des « disruptions ». Ces coups de foudre conduisent à la perte totale du confinement mais peuvent aussi endommager le revêtement des parois de la chambre. Des systèmes sont à l'étude pour limiter leur occurrence et amortir leur impact.

### Comment le plasma est-il chauffé ?

Pour atteindre les 150 millions de degrés nécessaires à la fusion du deutérium et du tritium, plusieurs dispositifs participent au chauffage. Le courant induit par le solénoïde contribue grâce à l'effet Joule. Il est complété par des systèmes de chauffage externe. Le premier consiste à injecter des atomes de deutérium neutres à très haute énergie (plus « chauds » que le plasma) dans le plasma. Lors de collisions dans le plasma, ces atomes s'ionisent et transfèrent leur énergie au plasma, ce qui conduit à augmenter la température. Le système suivant reprend le principe du four à microondes. Des ondes de fréquences comprises entre 40 et 55 mégahertz excitent les ions du plasma.

Un dernier dispositif émet des ondes à 170 gigahertz pour exciter les électrons. Un grand intérêt de ce système est que l'excitation est directionnelle. Il prend le relais du solénoïde central qui ne peut fonctionner en continu et se décharge progressivement. En accélérant les électrons dans une seule direction, ce système entretient le courant électrique dans le plasma, assurant sa stabilité. Il accroît aussi l'effet Joule et donc chauffe le plasma. Si l'idée peut sembler simple sur le papier, des dizaines d'années ont été nécessaires pour mettre au point tous ces systèmes dans le réacteur afin d'optimiser leur consommation en énergie !

### En plus du chauffage, quels sont les défis techniques liés au combustible ?

Le réacteur d'Iter réalisera la fusion du deutérium et du tritium. Le premier isotope, stable, se trouve par exemple dans l'eau de mer (il représente 1 atome d'hydrogène sur 6 400 dans les molécules d'eau). Un processus de distillation est nécessaire mais il est facilement accessible. Le tritium a quant à lui une période de demi-vie de 12,3 ans, il n'existe pas à l'état naturel. Pour Iter,



il sera produit ailleurs (ce qui coûte cher) et directement injecté dans la chambre à vide.

À terme, l'idée est de produire le tritium directement dans le réacteur. La fusion du deutérium et du tritium produit des neutrons qui échappent au champ magnétique. En tapissant les parois de la chambre avec du lithium, la capture d'un neutron par cet élément produit du tritium et de l'hélium. Iter aura recours à des modules dits « tritigènes », intégrés à la paroi pour tester ce mode de production.

Le lithium est relativement abondant sur Terre, mais il n'existe pas encore de grande filière pour son exploitation, même si cet élément suscite de plus en plus d'intérêt notamment dans le secteur des batteries. Il reste donc à inventer à une filière d'extraction efficace et respectueuse de l'environnement.

### L'émission de neutrons n'est-elle pas problématique ?

Si le combustible de la fusion ne devient pas lui-même radioactif, l'émission de neutrons de haute énergie peut activer certains atomes des parois de la chambre à vide et rendre ces matériaux radioactifs. Par exemple, un élément problématique est le chrome 59 stable, qui se transforme en chrome 60. Il faut donc choisir des matériaux d'une grande qualité et dénués d'éléments susceptibles d'être activés.

Globalement, la radioactivité produite par ces neutrons est beaucoup plus faible que dans les réacteurs à fission. On obtient des déchets avec des durées de vie d'au plus quelques dizaines d'années. Néanmoins, pour Iter, nous avons intégré toutes les procédures et normes de la sûreté nucléaire, avec la maintenance opérée par des robots pour aller chercher les pièces à remplacer, etc. Le démantèlement a aussi été pris en compte.

Sur une plateforme de 42 hectares, le complexe hébergeant le tokamak d'Iter (au centre de l'image ci-dessus) est entouré d'un grand nombre de bâtiments destinés aux systèmes annexes : le poste électrique, la zone d'évacuation de la chaleur, les bâtiments de conversion du courant alternatif-continu, l'usine cryogénique, etc. À l'intérieur du complexe, le puits d'assemblage de 30 mètres de diamètre et autant de profondeur accueillera le réacteur d'Iter (photo de droite). Plusieurs éléments sont déjà en place : diverses parties du cryostat et deux bobines du champ poloïdal. La structure cylindrique qui s'élève au centre est temporaire. Elle servira de support pour l'installation des neuf modules correspondant chacun à une portion de 40° de la chambre à vide et équipé de deux bobines du champ toroïdal (qui en a 18 en tout). Une fois ces éléments assemblés, le cylindre sera retiré et remplacé par le solénoïde central.





Pour la question du vieillissement des matériaux soumis à une irradiation intense de neutrons, une importante activité de recherche et de développement est toujours en cours pour trouver les meilleures solutions pour les successeurs d'*Iter*. Des dispositifs expérimentaux sont en cours de préparation en Espagne et au Japon sur cette question.

#### Existe-t-il des pistes de réacteurs sans émission de neutrons ?

Effectivement, une firme comme TAE Technologies explore la piste de la fusion hydrogène-bore 11. Elle ne produit pas de neutrons, mais il faut chauffer dix fois plus le plasma que pour *Iter*. Or à de telles températures, les électrons commencent à perdre de l'énergie par rayonnement. Cela devient difficile de trouver les bons paramètres pour une configuration stable.

Mais même si ce projet n'aboutissait pas, je considère que toutes ces initiatives sont très intéressantes. On assiste à une véritable accélération dans le secteur de la fusion. On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, *Iter*, entourée d'une myriade de projets plus modestes, qui ont leur utilité. Les ingénieurs et chercheurs attirés dans ces entreprises trouvent peut-être des solutions à des problèmes, mettront au point des méthodes d'optimisation qui seront intégrées aux successeurs d'*Iter*. L'expérience acquise par ces firmes sera aussi utile pour une étape clé : celle de la transition de réacteurs essentiellement destinés à la recherche vers des solutions commerciales.

#### Quel est le calendrier pour les années à venir ?

L'assemblage du dispositif d'*Iter* était en bonne voie mais a été, et est encore, très

perturbé par l'épidémie de Covid. Certaines usines où sont fabriqués les éléments du réacteur ont fermé pendant plusieurs mois ou ont opéré au ralenti. Le transport maritime est aussi très compliqué. La logistique sur le site de Cadarache est actuellement très difficile.

Le premier plasma sans fusion était prévu pour 2025. Nous aurons probablement du retard. En revanche, grâce à une planification modifiée, comme un jeu de Tetris, je suis assez optimiste pour le premier plasma deutérium-tritium en 2035 comme prévu.

Après *Iter*, son successeur, le réacteur *Demo* (*Demonstration power plant*, en anglais), pourrait démarrer dès 2050. L'objectif de ce projet est de démontrer qu'il est possible de produire de l'électricité avec un rendement commercial intéressant.

#### 2050... c'est bientôt !

Absolument. Il faut bien voir que la mission d'*Iter* est de défricher un vaste terrain avec de nombreuses problématiques à résoudre : les dimensions du réacteur, combiner l'expertise acquise à travers le monde, la sûreté nucléaire, etc. On reproche souvent à ce projet ses retards de calendrier et le dépassement de budget. Le défi était hors norme et trop difficile à évaluer pour en prendre toute la mesure à son commencement dans les années 1980. La bonne nouvelle est que nous touchons au but.

#### Dans le futur, quelle sera la place de la fusion nucléaire dans la production d'énergie ?

La priorité, c'est d'arrêter d'utiliser les ressources fossiles (le gaz, le charbon et le pétrole) pour limiter les émissions des gaz à effet de serre. Aujourd'hui, nous avons différentes solutions : des énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique) et la fission nucléaire.

Notre travail actuel consiste à développer une technologie supplémentaire pour offrir une option de plus dans le mix énergétique. Ce qui est assez clair, c'est que la fusion ne remplacera pas toutes les autres sources d'énergie. Elle n'a probablement pas vocation à être déployée partout, mais elle pourrait très bien être connectée au réseau près de grandes villes ou dans des bassins industriels.

La fusion présente de nombreux atouts : les réserves de combustibles seraient abondantes ; il n'y a aucun risque d'emballement ou d'explosion (si on arrête de chauffer le plasma, la réaction cesse) ; dans un réseau intelligent, les réacteurs à fusion peuvent être pilotés (allumés ou éteints) bien plus facilement que les réacteurs à fission ; les déchets radioactifs sont limités et peu dangereux, etc. Il reste à surmonter de nombreux défis techniques pour maîtriser pleinement cette source d'énergie.

*Propos recueillis par Sean Bailly*

#### BIBLIOGRAPHIE

A. Bécoutet, *L'Énergie de fusion*, Odile Jacob, 2019.

A. Creely et al., *Overview of the SPARC Tokamak*, *Journal of Plasma Physics*, 2020.

P. Rodriguez-Fernandez et al., *Overview of the SPARC physics basis towards the exploration of burning-plasma regimes in high-field, compact tokamaks*, *Proceedings of the 28th IAEA Fusion Energy Conference*, 2020.

## L'ESSENTIEL

- > Longtemps, le pouvoir thérapeutique du chanvre – *Cannabis sativa* – a été oublié. Il revient sur le devant de la scène, avec l'assouplissement des lois dans divers pays.
- > Certaines études ont déjà révélé ses effets bénéfiques pour divers troubles, comme

la douleur et l'anxiété, mais les données ne sont pas encore suffisantes pour confirmer son intérêt thérapeutique à coup sûr.

- > Ses bienfaits dépendent des doses et proportions de THC et CBD, ainsi que de l'âge et des antécédents du patient.

## L'AUTRICE



**ANNA LORENZEN**  
docteure en neurosciences  
et journaliste à Oldenburg,  
en Allemagne

# Cannabis

## Quand le prescrire?

Le THC et le CBD, ingrédients du cannabis, sont de plus en plus disponibles dans divers pays, sur prescription médicale ou en vente libre. Mais leur usage à des fins thérapeutiques fait encore l'objet d'études, pour en déterminer les avantages et inconvénients, en particulier pour les troubles mentaux.

Elles sont censées soulager la goutte et les rhumatismes, voire traiter le paludisme ou la constipation : il s'agit des fleurs femelles du chanvre, une plante de l'espèce *Cannabis sativa*. Dès 2800 avant notre ère, les habitants de la Chine utilisaient déjà le cannabis comme remède. Plus tard, le chanvre atteignit l'Inde, où il était utilisé comme antiépileptique, sédatif et anesthésique. A la Belle Époque, les préparations à base de cette plante jouirent même d'une grande popularité en Europe, par exemple en tant que médicament pour atténuer la douleur. Mais la dure campagne antidrogue qui battit son plein aux États-Unis au milieu du xx<sup>e</sup> siècle mit un terme – provisoire – à l'utilisation du cannabis comme «thérapie»...

Toutefois, depuis peu, grâce à la législation mondiale qui ne cesse d'évoluer sur le sujet, le cannabis fait lentement son retour dans les armoires à pharmacie. Sur recommandation de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), en 2020, la Commission des Nations unies sur

les stupéfiants l'a retiré de la liste des drogues les plus dangereuses. De sorte que, tôt ou tard, le cannabis sera probablement commercialisé dans de nombreux pays, non seulement comme médicament, mais aussi comme stimulant. C'est d'ailleurs déjà le cas dans certains États américains, en Uruguay, au Canada et en Afrique du Sud : on peut y acheter du chanvre sous forme de marijuana – nom donné aux fleurs femelles séchées – ou de haschisch – la résine de la plante femelle – pour un usage personnel, récréatif ou médical.

### LE CANNABIS REVIENT DANS LES ARMOIRES À PHARMACIE

En France, le ministère de la Santé a publié un décret autorisant l'usage du cannabis à des fins thérapeutiques le 9 octobre 2020, et une expérimentation a été lancée en mars 2021 pour tester son efficacité auprès de 3000 patients présentant des douleurs insoutenables non atténuées par les traitements classiques. Ce n'est qu'après l'analyse des résultats de cet essai, et









quelques évolutions de la loi française, que les médecins prescriront peut-être du cannabis dans certains cas.

Ailleurs en Europe, la situation a commencé à changer un peu plus tôt. En Allemagne, les médecins ont depuis 2017 le droit de délivrer une ordonnance pour des fleurs de cannabis et leurs extraits à des patients gravement malades, à condition que les substances proviennent de cultures contrôlées par l'État. Autre critère pour en prescrire : toutes les autres options thérapeutiques doivent avoir été testées et s'être révélées inefficaces.

Mais pour quoi le cannabis serait-il un bon remède ? En tant que médicaments, les substances contenues dans le cannabis ne sont pour l'instant recommandées que pour quelques troubles. Par exemple, comme analgésiques dans le cas de la sclérose en plaques ou comme anticonvulsifs pour les formes graves d'épilepsie. Administrées parallèlement à la chimiothérapie, elles sont aussi censées prévenir les nausées et les vomissements qui surviennent souvent pendant le traitement. Elles stimuleraient également l'appétit de certains patients en phase terminale de cancers ou d'autres maladies. C'est d'ailleurs pour ces applications que l'on teste le cannabis en France depuis le mois de mars 2021.

### NABIXIMOLS, DRONABINOL, NABILONE...

Pour ce faire, il existe déjà sur le marché des médicaments composés de cannabinoïdes synthétiques ou naturels et approuvés par certaines autorités de santé. Ces derniers contiennent surtout du tétrahydrocannabinol, le THC, la principale substance psychotrope du cannabis, et du cannabidiol, le CBD, qui n'est pas psychoactif et ne modifie donc pas le fonctionnement psychique (voir l'encadré ci-contre). Par exemple, le médicament nabiximols contient autant de THC que de CBD ; on l'utilise comme spray oral pour soulager la sclérose en plaques et les douleurs chroniques. Quant aux dronabinol et nabilone, ils sont composés uniquement de THC. Et le CBD pur, vendu sous le nom d'« épidiol » et déjà autorisé en France, réduirait les crises d'épilepsie infantile et grave. Mais tous ces médicaments sont parfois consommés pour d'autres troubles... Et en général, en automédication, sans prescription médicale.

En effet, cela fait bien longtemps que des personnes souffrant de divers problèmes de santé physique ou mentale utilisent le cannabis de leur propre chef. Pour quels motifs ? En 2019, une analyse de plusieurs études s'appuyant sur les dires et pratiques des consommateurs de cannabis a révélé les raisons les plus fréquentes : douleur, troubles anxieux et dépression. Certains utilisateurs, souvent

### LES CANNABINOÏDES

Le chanvre *Cannabis sativa* contient plus de 400 molécules, dont une centaine sont des cannabinoïdes. Les plus importants sont le tétrahydrocannabinol, ou THC, au fort pouvoir psychotrope, et le cannabidiol, ou CBD, non psychoactif. Ces phytocannabinoïdes sont principalement produits par les fleurs des plantes femelles. Mais dans notre corps, il existe aussi deux molécules similaires, nommées « endocannabinoïdes », qui se lient aux mêmes récepteurs cannabinoïdes que le THC, mais de façon moins intense.

« fumeurs » de la plante, font part d'améliorations étonnantes de leur état psychique... Mais ces témoignages ne représentent en rien une preuve d'efficacité du cannabis ni de son mécanisme d'action. S'agit-il simplement d'un effet placebo – bénéfique parce qu'on croit au traitement sans que celui-ci n'ait d'effet réel – ou de quelque chose de plus important ?

### DES EFFETS POSITIFS SUR LES TROUBLES MENTAUX ?

En fait, dans l'organisme et le cerveau, les voies de signalisation cellulaires sur lesquelles agissent les cannabinoïdes, comme le THC et le CBD, mais aussi les « endocannabinoïdes » naturellement présents dans notre corps, sont impliquées dans une multitude de processus cognitifs et émotionnels. Par exemple, chez les personnes souffrant de schizophrénie, de dépression ou de trouble de stress post-traumatique (TSPT), on constate des modifications de la densité des récepteurs cannabinoïdes dans différentes régions cérébrales, en comparaison avec des sujets non atteints d'un trouble mental. Il est donc plausible que la consommation de chanvre influe sur ces réseaux, et leurs récepteurs cannabinoïdes, pour atténuer ou, à l'inverse, aggraver les symptômes de ces pathologies.

Mais la recherche sur le fonctionnement du cannabis et du système cannabinoïde endogène n'en est encore qu'à ses balbutiements... Pourquoi ? D'abord, parce que ce système cannabinoïde de l'organisme est très complexe. On n'a identifié les récepteurs cannabinoïdes impliqués, le CB<sub>1</sub> et le CB<sub>2</sub>, que dans les années 1990, et le chanvre contient des centaines de substances – pas seulement des cannabinoïdes – qui interagissent avec diverses molécules et récepteurs dans le corps et influent sur différentes voies de transmission des signaux : il est par conséquent difficile de déterminer quel composant du cannabis est responsable de tel ou tel effet.

Ensuite, parce que la pénalisation des composants du cannabis a entravé la recherche, rendant souvent leur accès plus difficile. Et l'intérêt des industriels pour les études avec le cannabis reste faible, car les médicaments qui en seraient issus ne promettent pas beaucoup d'argent à la clé. En outre, la conception des études soulève des difficultés : en effet, si vous voulez tester l'effet du THC comme médicament, il faut administrer le THC sous une certaine forme à un premier groupe de patients et un placebo sous la même forme à un autre groupe de sujets. Et tous doivent croire que le produit qu'ils prennent contient du THC pour que l'on puisse comparer l'effet de la molécule à celui du placebo. Le problème étant qu'on se rend vite compte si le traitement que l'on prend

contient ou non du THC, car celui-ci a des effets psychotropes... Impossible, donc, de mesurer l'effet placebo.

Néanmoins, il y a des raisons d'espérer. Grâce aux assouplissements législatifs de plus en plus fréquents, le nombre de publications scientifiques sur le sujet a considérablement augmenté ces dernières années. Les premiers résultats suggèrent que les cannabinoïdes atténueraient bien les symptômes de divers troubles psychiatriques. Mais un fait devient aussi de plus en plus clair : le cannabis est une arme à double tranchant ! Son effet dépend parfois des proportions de THC et de CBD consommées, ainsi que d'autres facteurs, comme l'âge ou les antécédents familiaux de l'utilisateur.

C'est ce que montrent, par exemple, différentes études sur les troubles anxieux. En théorie, les récepteurs cannabinoïdes de notre corps représentent une bonne cible pharmacologique pour le traitement des troubles de l'humeur, car ils sont majoritairement présents

dans les structures cérébrales du système limbique, comme l'amygdale et l'hippocampe, impliquées dans le traitement des émotions (voir l'encadré ci-dessous). En outre, en se fixant sur les récepteurs cannabinoïdes, le THC et le CBD influent sur la libération de neurotransmetteurs comme la sérotonine, la noradrénaline et le glutamate, qui jouent un rôle important dans le stress et l'anxiété.

### DÉTENTE À PETITES DOSES, STRESS À FORTES

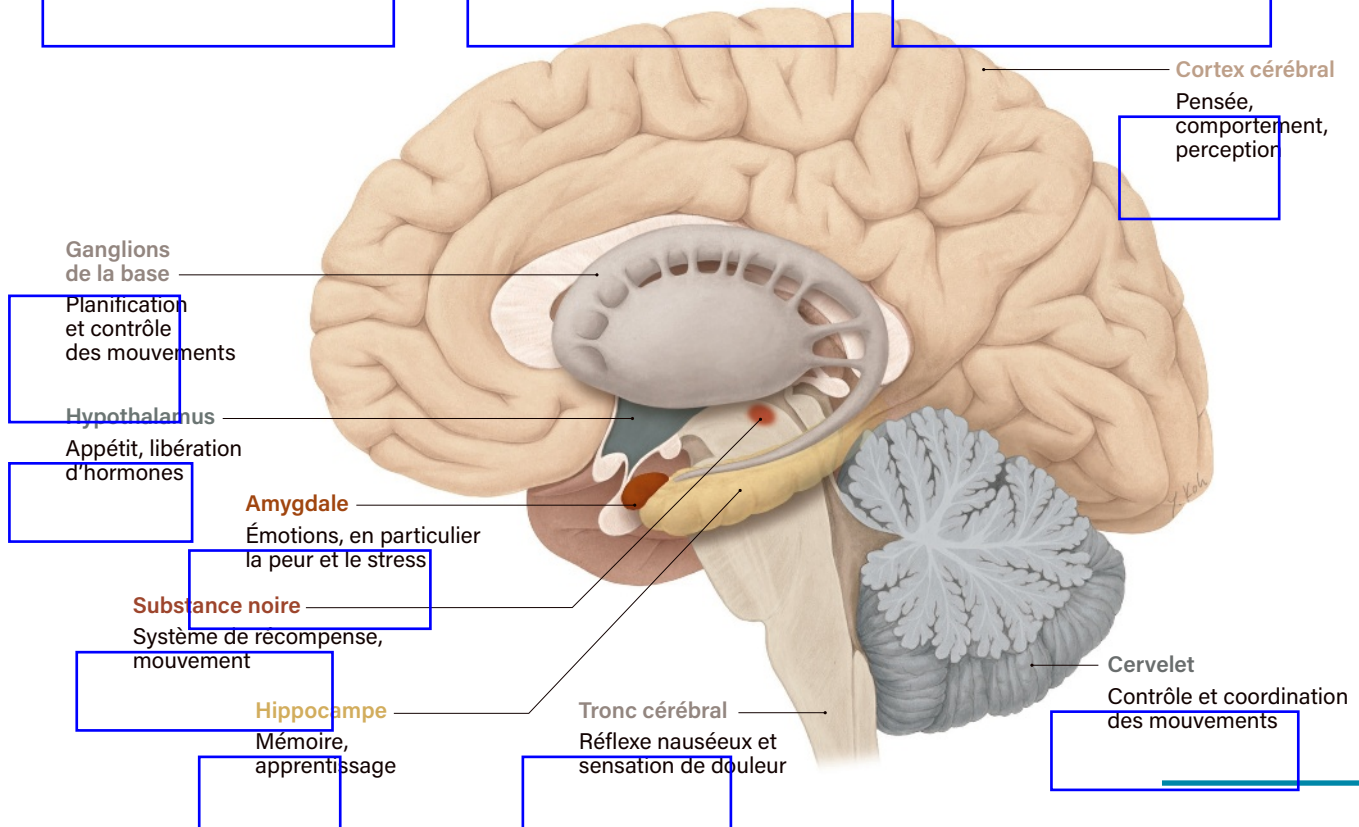
En 2019, Nicola Black et ses collègues, de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney, ont analysé 84 études portant sur les bénéfices ou inconvénients du cannabis thérapeutique dans les troubles mentaux. Selon eux, il existe bien des preuves – quoique encore vagues – d'un effet anxiolytique du THC : cette substance nous « détendrait »... Mais, comme c'est souvent le cas en pharmacologie, c'est la dose qui fait la potion... ou le poison ! De petites quantités du cannabinoïde psychoactif ont

## COMMENT LE CANNABIS AGIT SUR LE CERVEAU

Les principes actifs du cannabis, le THC et le CBD, se fixent sur deux récepteurs cannabinoïdes distincts dans le corps, les CB<sub>1</sub> et les CB<sub>2</sub>. Les premiers se trouvent principalement dans le cerveau, les seconds dans le système de défense immunitaire.

Les régions cérébrales où la densité des récepteurs CB<sub>1</sub> est la plus élevée et les processus qu'ils influencent sont indiqués ci-dessous. Les deux cannabinoïdes ont des effets en partie opposés : le THC est un agoniste des CB<sub>1</sub> – il les active et mime leur effet – ;

le CBD, en revanche, bloque parfois ces récepteurs. De sorte que, contrairement au THC, le CBD n'est pas psychoactif. Les médicaments à base de cannabis contiennent soit du THC, soit du CBD, soit un mélange des deux substances : leurs effets diffèrent donc.





vraisemblablement un effet calmant, tandis que de fortes concentrations auraient l'effet opposé, provoquant de l'anxiété, voire de la panique.

Un lien confirmé en 2017 par Harriet de Wit et ses collègues, de l'université de Chicago.

Les chercheurs ont invité 42 adultes en bonne santé à passer un test de stress social : ils devaient prononcer un discours devant un public. Au préalable, les volontaires ont consommé soit des comprimés contenant du THC pur, à deux doses différentes, soit un placebo composé de dextrose (n'ayant aucune activité pharmacologique). Résultat : les sujets ayant avalé 7,5 milligrammes de THC se sont sentis bien moins stressés pendant le discours que les personnes ayant pris le placebo. Un phénomène qui, selon les chercheurs, serait lié à un effet modérateur du THC sur l'activité de l'amygdale. En revanche, les individus ayant pris la dose plus élevée de THC, de 12,5 milligrammes, étaient bien plus anxieux et ont eu plus d'émotions négatives que les autres.

De même, le CBD est un candidat pour le traitement des troubles de l'anxiété. En 2011, l'équipe de José Crippa, à l'université de São Paulo, a donné à un total de 24 personnes souffrant de phobie sociale soit 600 milligrammes de CBD, soit un placebo, avant de les faire s'exprimer en public. Par rapport au placebo, le cannabinoïde a bien eu un effet anxiolytique, selon l'autoévaluation que les participants ont faite de leur prestation. En outre, les sujets ayant reçu le CBD se sentaient en meilleure forme mentale que les autres. D'autres travaux suggèrent que le CBD « désamorcerait » aussi l'effet négatif angoissant des doses élevées de THC. Toutefois, il est encore nécessaire de réaliser des études plus larges et de qualité avant que les experts soient en mesure de formuler des recommandations.

## CINQ FOIS PLUS DE RISQUES DE PSYCHOSE CHEZ LES FUMEURS

Quoi qu'il en soit, jusqu'à présent, il semble que le rapport entre les deux substances, THC et CBD, soit déterminant : de plus grandes quantités de THC seraient nocives, tandis que davantage de CBD serait plutôt inoffensif, voire curatif. Un mécanisme qui apparaît évident dans le cas de la schizophrénie. En effet, plusieurs études révèlent que les personnes présentant un risque élevé de psychose ne devraient pas toucher au cannabis, et au premier rang les jeunes. Car l'herbe déclenche parfois un épisode psychotique et intensifie alors les troubles cognitifs préexistants. Probablement à cause de sa substance psychotrope active, le THC. Bien que le mécanisme neurobiologique en jeu ne soit pas encore bien compris, on suppose que le THC interfère avec la transmission des signaux neuronaux médiée par la dopamine dans le striatum et le cortex

Sur recommandation de l'OMS, la commission des Nations unies sur les stupéfiants a retiré le cannabis de la liste des drogues les plus dangereuses en 2020. Tôt ou tard, le cannabis sera probablement commercialisé dans de nombreux pays comme médicament ou stimulant

préfrontal, via les récepteurs CB<sub>1</sub>. Or ce système dopaminergique est aussi à l'origine des troubles psychotiques...

En 2019, Marta Di Forti, du Royal College de Londres, a mené, avec des experts britanniques et italiens, une étude sur le risque de psychose chez les fumeurs de cannabis. Les chercheurs ont interrogé plus de 900 patients ayant été traités pour un premier épisode psychotique dans diverses cliniques d'Europe et du Brésil, sur leur consommation de cannabis, puis ont comparé leurs réponses avec celles de plus de 1 000 sujets témoins en bonne santé.

Ainsi, l'analyse a montré que les personnes fumant chaque jour du cannabis avec une teneur en THC de plus de 10% ont environ cinq fois plus de risques de faire un épisode psychotique. Selon les chercheurs, le nombre de schizophrènes à Amsterdam, où la consommation d'herbe très forte est fréquente, serait réduit de moitié si on interdisait l'utilisation quotidienne du chanvre. D'autres études scientifiques confirment par ailleurs que le cannabis augmente le risque de psychose.

## LE CBD, UN ANTIPSYCHOTIQUE ?

En revanche, le CBD, lui, suscite l'attention et l'intérêt des scientifiques, car, à l'inverse du THC, il aurait un pouvoir antipsychotique. En effet, en 2011, l'équipe dirigée par Christian Schubart, du Centre médical universitaire d'Utrecht, a mené une enquête en ligne auprès d'environ 2 000 consommateurs de cannabis. Fréquence et types de consommation ont été recueillis, ainsi que les éventuels symptômes psychotiques, grâce à un questionnaire standardisé. Les chercheurs ont pu réaliser cette étude, car le chanvre est un stimulant légal aux Pays-Bas sous certaines conditions : ils ont donc eu accès aux teneurs en THC et en CBD des différents produits consommés.

Résultat : plus le cannabis contient de CBD, moins les fumeurs risquent de faire un épisode psychotique, indépendamment de la teneur en THC. Mais d'autres études n'ont pas retrouvé cet effet... Probablement parce que l'âge des consommateurs, de nouveau, joue un rôle : une théorie suggère que le CBD ne conviendrait comme thérapie complémentaire que dans les premières phases de la schizophrénie. De nombreuses questions restent donc ouvertes. Toutefois, Eva Hoch, psychologue et chercheuse sur le cannabis à la clinique de l'université Ludwig-Maximilian, à Munich, estime qu'il reste utile d'étudier plus encore le potentiel antipsychotique du CBD.

Autre bénéfice envisagé du cannabis : de nombreuses personnes affirment fumer ou consommer du cannabis en raison de ses effets positifs sur l'humeur. Le chanvre permettrait-il de lutter contre les symptômes de la dépression ?

Cette question reste âprement débattue d'un point de vue scientifique. Mais une étude a révélé que les femmes déprimées présentent, dans leur cerveau, des concentrations réduites d'endocannabinoïdes, en comparaison avec des personnes en bonne santé mentale. Et plus la concentration cérébrale d'endocannabinoïdes est faible, plus la mauvaise humeur perdure, selon une autre étude de l'équipe de Matthew Hill, à l'université de Colombie-Britannique à Vancouver, publiée en 2008.

Qui plus est, les cannabinoïdes influent sur la libération de neurotransmetteurs, notamment dans le système limbique, et ont donc parfois un effet relaxant et euphorisant. Un indice supplémentaire de leur bénéfice sur l'humeur. Mais malgré ces résultats et les nombreux rapports positifs des consommateurs, le potentiel thérapeutique du cannabis sur la dépression n'a guère été étudié jusqu'à présent: les études cliniques sur le sujet font cruellement défaut.

Toutefois, une poignée d'études d'observation et de retours d'expérience suggèrent bien un effet antidépresseur. Staci Gruber, de l'hôpital McLean, à Belmont, a ainsi constaté que le fait de fumer de la marijuana atténuait quelque peu la phase dépressive des sujets souffrant de troubles bipolaires. Mais, de nouveau, il existe parfois des effets paradoxaux: une consommation modérée de cannabis semble améliorer l'humeur de ces patients à court terme, mais une consommation excessive a l'effet inverse et intensifie même leurs symptômes dépressifs...

## SE REMETTRE D'UN TRAUMATISME?

Depuis un certain temps, on sait également que de nombreuses personnes souffrant d'un TSPT, par exemple les victimes d'un attentat, fument souvent du cannabis, vraisemblablement pour s'automédiquer. Au Canada et aux États-Unis, le chanvre médicinal est déjà approuvé comme traitement des traumatismes. Ce qui suggère une certaine innocuité. Mais, là aussi, la prudence est de mise...

En effet, certains travaux sur le THC et le CBD soulignent un possible bénéfice thérapeutique. Par exemple, dans plusieurs études, le nabilone, contenant uniquement du THC, a amélioré le sommeil de patients traumatisés, notamment en réduisant leurs cauchemars. Des expériences avec des animaux ont aussi montré que l'amygdale, impliquée dans le contrôle des émotions, en particulier de la peur, dépend fortement du système cannabinoïde endogène: la saturation de ses récepteurs cannabinoïdes par des molécules actives du cannabis pourrait modifier son fonctionnement et favoriser l'oubli des souvenirs désagréables, effrayants.

Toutefois, en 2020, Sabrina Botsford, de l'université de Toronto, a obtenu une conclusion opposée: le cannabis augmenterait les symptômes du TSPT au lieu de les atténuer. Les Académies américaines des sciences, de l'ingénierie et de la médecine (Nasem) estiment donc que les études scientifiques réalisées à ce jour sont insuffisantes pour statuer sur l'effet thérapeutique du cannabis dans le cas des troubles de stress post-traumatique.

## SOULAGER EFFICACEMENT LA DOULEUR

C'est une tout autre histoire en ce qui concerne les douleurs chroniques, celles qui durent plusieurs mois, parfois sans cause apparente! Selon la Nasem, les preuves scientifiques révèlent déjà un avantage du cannabis. Aujourd'hui, la douleur est d'ailleurs, et de loin, la principale raison pour prescrire du chanvre médicinal: 70% des ordonnances de cannabis réalisées dans le monde mentionnent cette indication. D'autant que près d'un habitant de la planète sur cinq souffre de douleurs persistantes. Outre les médicaments, les médecins ont aussi recours à l'exercice physique et aux thérapies

## CONTRE QUOI LE CANNABIS EST-IL UN MÉDICAMENT?

Différentes études suggèrent que le cannabis et ses composés, le THC et le CBD principalement, soulagent la douleur, réduisent les nausées, stimulent l'appétit et atténuent les spasmes musculaires d'origine neurologique. Mais ils sont aussi utilisés contre d'autres maladies et troubles quand les différents traitements disponibles sont inefficaces. Une étude de l'Institut fédéral allemand des médicaments et des dispositifs médicaux (BfArM pour Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte) révèle, pour la première fois, les indications pour lesquelles le cannabis est le plus souvent prescrit en Allemagne, où il est autorisé sur ordonnance depuis 2017.

| Maladie/Trouble                    | Part (en pourcentage) |
|------------------------------------|-----------------------|
| Douleur                            | 69                    |
| Spasmes                            | 11                    |
| Anorexie                           | 8                     |
| Nausées                            | 4                     |
| Dépression                         | 3                     |
| Trouble déficitaire de l'attention | 2                     |
| Manque d'appétit                   | 1                     |
| Maladie intestinale                | 1                     |
| Tics / Syndrome de la Tourette     | 1                     |
| Épilepsie                          | 1                     |
| Syndrome des jambes sans repos     | Inférieur à 1         |
| Trouble du sommeil                 | Inférieur à 1         |
| Agitation                          | Inférieur à 1         |



psychologiques pour traiter les douleurs chroniques. Mais, souvent, cela ne suffit pas.

Or le système cannabinoïde endogène est surtout connu pour son rôle dans le contrôle de la douleur, par son interaction avec le circuit de la douleur. Toutefois, seules quelques études révèlent clairement les effets positifs du chanvre ou de ses composants sur les voies de signalisation nociceptives. De sorte qu'actuellement, le traitement par du cannabis n'est recommandé que dans le cas de douleurs neuropathiques, celles provoquées par une atteinte des nerfs.

En effet, récemment, une nouvelle analyse scientifique, réalisée par Michael Überall, vice-président de la Société allemande de médecine de la douleur (DGS), a conclu que le médicament nabiximols (comprenant du THC et du CBD) complète efficacement les autres traitements contre la douleur, comme la morphine. On suppose d'ailleurs que les deux cannabinoïdes amplifient les effets antidouleur des autres thérapies. En revanche, Überall considère que l'utilisation du nabiximols pour d'autres motifs, comme les douleurs aiguës ou liées à un cancer, serait moins appropriée... Mais en ajoutant, malgré tout, que l'effet anxiolytique et relaxant des cannabinoïdes faciliterait la gestion de la douleur à long terme, quelle qu'elle soit.

Aujourd'hui, une autre question majeure concernant le cannabis thérapeutique reste en suspens : les cannabinoïdes interagissent-ils avec d'autres médicaments et, si oui, comment ? La posologie, la voie d'administration, l'âge et le sexe du patient joueraient un rôle inattendu dans l'efficacité. En outre, de nombreuses personnes consomment du cannabis sous forme de joint, souvent mélangé à du tabac. Or il est clairement établi que fumer est dangereux pour la santé et, de fait, fumer du cannabis annulerait tous ses effets positifs et serait donc nocif.

## LE JOINT : PAS LA BONNE SOLUTION

En 2018, un groupe de recherche dirigé par Fiona Clement, de l'école de médecine Cummings de l'université de Calgary, a publié une revue de la littérature sur les principaux risques liés au fait de fumer de la marijuana : risque accru d'accident vasculaire cérébral et de cancers des testicules, altération de la mémoire et des apprentissages, modifications structurales du cerveau. En outre, on observe des dysfonctionnements de diverses fonctions cognitives, comme l'attention, ainsi que des troubles psychologiques, notamment des psychoses, des troubles maniaques et une augmentation du nombre de suicides. Des facteurs à prendre en compte en fonction de chaque patient quand on envisage d'utiliser du cannabis en thérapie, insistent les chercheurs.

## DU CBD À TOUTES LES SAUCES ?

Ces dernières années, on a vu fleurir un peu partout des boutiques proposant des produits à base de CBD, et ce dans le monde entier. Avec parfois de curieux excès... Par exemple, aux États-Unis, des cocktails, du café, des sels de bain et même des friandises pour chiens « anxieux » sont enrichis en CBD. En Europe aussi, tout le monde s'y met : les cavistes, les kiosques, les pharmacies, les supermarchés, pour répondre à l'énorme demande, proposent du CBD sous forme d'huile, de capsules, d'oursons en gélatine, de cosmétiques, ou de fleurs de chanvre naturelles. Mais pour beaucoup d'effets revendiqués, l'efficacité réelle reste encore très discutable.



## BIBLIOGRAPHIE

M. Colizzi et al., **Unraveling the intoxicating and therapeutic effects of cannabis ingredients on psychosis and cognition**, *Frontiers in Psychology*, 2020.

J. Sarris et al., **Medicinal cannabis for psychiatric disorders : A clinically-focused systematic review**, *BMC Psychiatry*, 2020.

N. Black et al., **Cannabinoids for the treatment of mental disorders and symptoms of mental disorders : A systematic review and meta-analysis**, *Lancet Psychiatry*, 2019.

M. Di Forti et al., **The contribution of cannabis use to variation in the incidence of psychotic disorder across Europe (EU-GEI) : A multicentre case-control study**, *Lancet Psychiatry*, 2019.

Eva Hoch, cependant, aimerait voir davantage de recommandations fondées sur des preuves. Les médecins doivent donc toujours examiner attentivement les effets auxquels il faut s'attendre chez chaque patient, ainsi que les risques et les contre-indications. La Société allemande de médecine de la douleur préconise de prescrire des médicaments prêts à l'emploi, avec des taux de THC et de CBD clairement définis, plutôt que du chanvre sous forme de fleurs, car les premiers sont mieux étudiés, moins risqués et plus faciles à doser que les fleurs femelles elles-mêmes.

On l'aura donc compris : de nombreuses questions restent encore sans réponse. Mais la légalisation sur le cannabis évolue un peu partout dans le monde et stimule la recherche sur ses effets bénéfiques et néfastes. L'Allemagne et la France sont encore très en retard dans ce domaine. Mais, lentement, les choses changent : en 2019, le gouvernement allemand a mis en place un réseau pour promouvoir la recherche sur le cannabis et la culture de la plante en Allemagne, et, après l'expérimentation française sur le cannabis thérapeutique, il est probable que l'on puisse en prescrire sur ordonnance pour certains patients. Reste donc à voir si l'avenir du chanvre médicinal sera brillant ou nébuleux. ■

## COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 114 (févr. 22)  
réf. DO114



N° 113 (nov. 21)  
réf. DO113



N° 112 (août 21)  
réf. DO112



N° 111 (mai 21)  
réf. DO111



N° 110 (fév. 21)  
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)  
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)  
réf. DO108



N° 107 (mai 20)  
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)  
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)  
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)  
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)  
réf. DO103

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR [BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR](https://boutique.groupepourlascience.fr)

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève– 92100 Boulogne Billancourt – email : [serviceclients@groupepourlascience.fr](mailto:serviceclients@groupepourlascience.fr)

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,40 €.**

**1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES** à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1<sup>re</sup> réf. 01 x 10,40 € = 10,40 €  
 2<sup>e</sup> réf.    x 10,40 € =    €  
 3<sup>e</sup> réf.    x 10,40 € =    €  
 4<sup>e</sup> réf.    x 10,40 € =    €  
 5<sup>e</sup> réf.    x 10,40 € =    €  
 6<sup>e</sup> réf.    x 10,40 € =    €

**TOTAL À RÉGLER**    €

Offre valable jusqu'au 21/12/22 en France Métropolitaine.  
Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

**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 en nous retournant ce bulletin complété



Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur [boutique.groupepourlascience.fr](https://boutique.groupepourlascience.fr)

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utilisons 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, 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](mailto:protection-donnees@pourlascience.fr).



# Comment soigner dans l'espace

S. Thierry, M. Komorowski, A. Golemis et L. André-Boyet

La santé des astronautes pose d'innombrables défis aux futures missions vers la Lune ou Mars, et même au tourisme spatial. L'enjeu : prévenir les risques médicaux et pouvoir intervenir en cas de force majeure.





Le 14 juin 2018, l'astronaute américain Richard Arnold effectue une sortie hors de la Station spatiale internationale, pour installer notamment des caméras. L'opération dure 6 heures et 49 minutes. Ces missions extravéhiculaires sont dangereuses et stressantes. En cas d'accident, de nombreux protocoles sont prévus, mais tous les scénarios ne peuvent être anticipés.



## L'ESSENTIEL

> L'espace est un milieu hostile. Les astronautes sont exposés aux rayons cosmiques, au stress, à la fatigue, à l'impesanteur, etc. Ces différents facteurs ont une influence négative sur l'organisme.

> Les agences spatiales ont développé une stratégie en trois volets : prévention, contre-mesures et autonomie médicale des astronautes.

> L'émergence du tourisme spatial et les projets d'exploration de la Lune ou de Mars rendent plus aiguë encore la question de l'autonomie médicale des astronautes. Équipements avancés d'aide au diagnostic et simulations en laboratoire esquissent des réponses.

## LES AUTEURS



**SÉAMUS THIERRY**  
médecin  
anesthésiste-  
réanimateur  
au groupe  
hospitalier  
de Bretagne-Sud,  
Lorient,  
et chercheur  
associé au LF3C  
de l'université  
de Bretagne-Sud



**MATTHIEU KOMOROWSKI**  
médecin  
anesthésiste-  
réanimateur,  
à l'hôpital Charing  
Cross, à Londres,  
et maître  
de conférences à  
l'Imperial College



**ADRIANOS GOLEMIS**  
médecin  
des astronautes  
auprès de l'ESA,  
à Cologne,  
et membre  
du Medes-Institut  
de médecine  
et physiologie  
spatiales,  
à Toulouse



**LAURA ANDRÉ-BOYET**  
instructrice  
des astronautes  
auprès de l'ESA,  
à Cologne,  
attachée au centre  
de formation  
de l'aviation  
de la Lufthansa

**L**e 24 février 1997, à bord de la station orbitale russe *Mir*, un incendie se déclare lors d'une opération de maintenance d'un générateur d'oxygène. Une cartouche de perchlorate de lithium prend feu. À plus de 350 kilomètres d'altitude et en impesanteur, la situation est d'emblée critique. D'épaisses fumées mélangeant particules de combustion et boulettes de métal fondues flottent dans la station, exposant les astronautes à des risques de brûlures graves ou une perte de connaissance par asphyxie. Les flammes menacent de percer les parois de la station et de dépressuriser l'habitacle, ce qui tuerait rapidement ses occupants. Les membres d'équipage enfilent en urgence leurs masques de protection respiratoire pour se prémunir des fumées toxiques, activent les extincteurs et parviennent à maîtriser l'incendie en quelques minutes sous le hurlement des alarmes. Seules quelques blessures légères sont à déplorer. Le pire est miraculeusement évité. Cet incident critique illustre trois des risques les plus redoutés à bord d'une station spatiale pour la survie des astronautes : le feu, la dépressurisation et la contamination de l'atmosphère de la station. Car, en cas de blessure grave d'un astronaute, les multiples contraintes entourant un vol spatial compliquent considérablement les possibilités de soins médicaux lourds en cours de mission.

À l'image des marins qui entreprennent le tour du monde en solitaire, l'assistance et surtout l'évacuation médicale ne sont pas toujours envisageables. Il est dès lors impératif de prévenir les risques plutôt que de les subir et d'anticiper un grand nombre de scénarios et rendre l'équipage le plus autonome possible face aux différents imprévus de santé. Si l'orbite terrestre basse est occupée depuis plus de

vingt ans par la *Station spatiale internationale* (ISS), récemment rejointe par la station chinoise, de nouvelles perspectives de présence humaine amènent à repenser la gestion du risque médical. Les vols touristiques, orbitaux ou suborbitaux, soulèvent par exemple la question de la rigueur des critères médicaux à appliquer aux participants. L'équilibre correct entre des critères trop stricts (réduisant le nombre de clients potentiels) ou trop larges (avec le risque de dégradation d'une pathologie chronique lors du vol) n'est pas encore établi. Au-delà, la conquête de l'espace dit « profond », avec l'occupation du sol lunaire et l'exploration martienne, pose d'autres interrogations quant aux capacités de protection et d'adaptation de l'humain face à ce milieu hostile, sans compter les difficultés du soin en autonomie totale.

## UN MILIEU À RISQUES

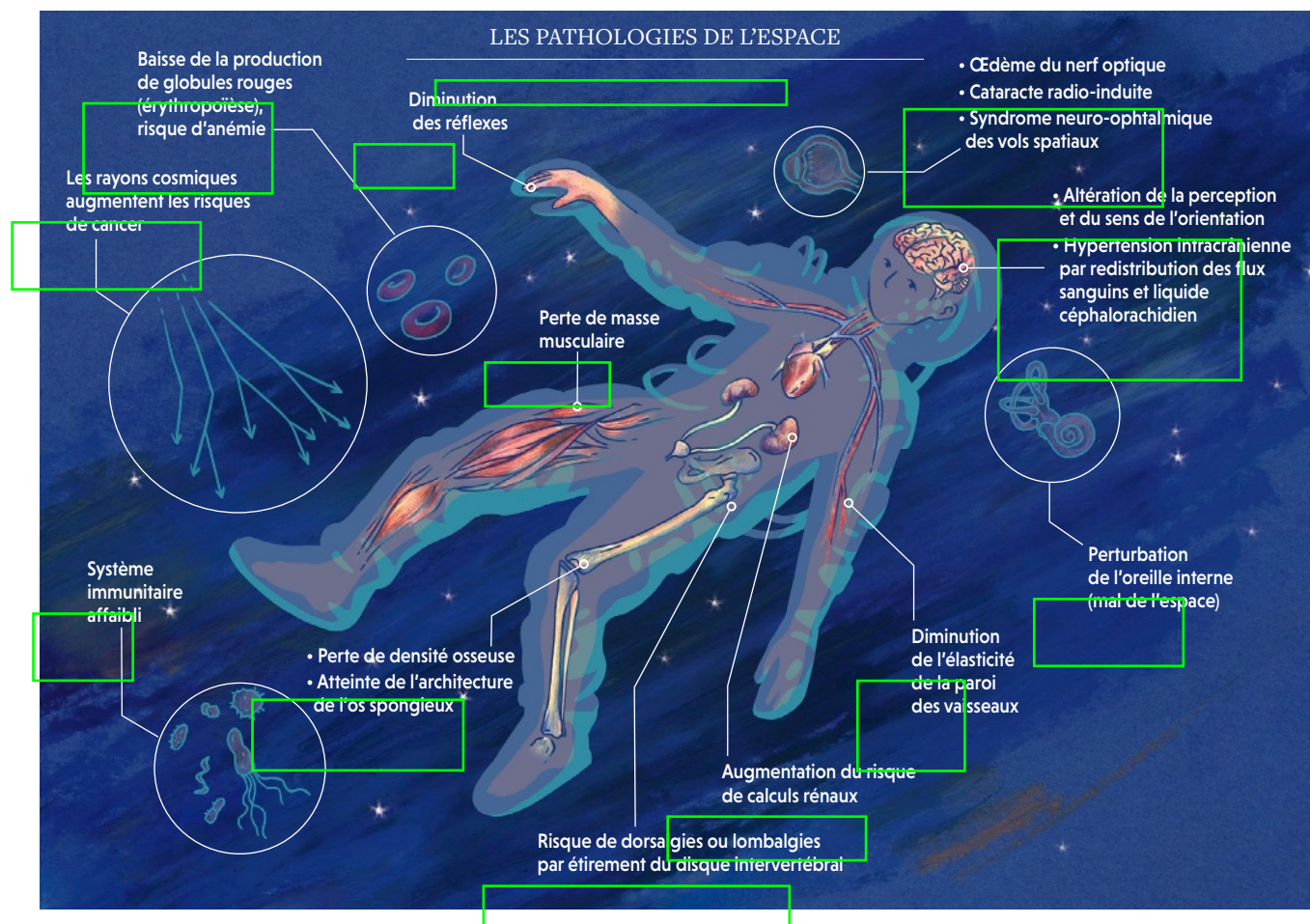
Or, même les activités quotidiennes à bord de la station se révèlent parfois dangereuses. Comme à bord d'un sous-marin, les astronautes évoluent pendant plusieurs mois dans un lieu confiné et bruyant, au milieu de nombreux câbles électriques, panneaux de contrôle, systèmes de refroidissement, pouvant théoriquement être à l'origine d'électrisation, brûlures ou exposition à des produits irritants. Autre spécificité du métier, certaines opérations de maintenance ou de réparation de composants (batteries, câbles, antennes...) imposent des sorties hors de la station (voir la photo page 47). Ces sorties dites « extravéhiculaires » sont risquées et physiquement éprouvantes. Elles durent en général plusieurs heures et requièrent un niveau de concentration très élevé. Les combinaisons spatiales utilisées lors de ces missions sont de véritables ministaions individuelles qui contiennent tous les équipements indispensables au support des fonctions

vitales. À l'intérieur de celles-ci, les astronautes évoluent dans une atmosphère hypobare (0,3 bar), qui améliore la souplesse de la combinaison, nécessaire à la motricité et à la manipulation d'outils. Cette transition entre l'atmosphère de la station et l'atmosphère hypobare de la combinaison est contrôlée et préparée au sein d'un sas de dépressurisation, en vue de protéger les astronautes du risque de maladie de décompression, similaire à celle, bien connue, des plongeurs. Enfin, il existe une menace importante de collision avec des débris spatiaux ou des micrométéorites, qui circulent à plusieurs kilomètres par seconde.

Autre contrainte environnementale, et non des moindres : l'impesanteur. Sur Terre, nous pouvons marcher, sauter, courir, garder l'équilibre, ajuster notre débit cardiaque à l'effort et aux changements de position grâce à notre physiologie, adaptée à la pesanteur terrestre. Nos muscles, nos os, notre oreille interne, notre pompe cardiaque et notre réseau vasculaire ont évolué depuis des millions d'années en présence de cette force. Cependant, à 400 kilomètres d'altitude, les astronautes sont en chute libre (voir l'encadré page 50). Chaque système physiologique de l'organisme tente de

retrouver une nouvelle homéostasie, c'est-à-dire un nouveau point d'équilibre fonctionnel, mais ces adaptations ont des limites. L'absence de contrainte... devient une contrainte : l'os se déminéralise et se fragilise peu à peu, la réduction des sollicitations fonctionnelles entraîne par exemple une déminéralisation osseuse rapide qui aggrave le risque de fractures et de formation de calculs rénaux. Les muscles posturaux s'atrophient, les parois des vaisseaux sanguins s'épaississent. L'acuité visuelle baisse parfois à cause, entre autres, d'une hypertension intracrânienne accompagnant la redistribution des flux sanguins vers la moitié supérieure du corps. La coordination sensori-motrice est altérée. Cette suppression de la pesanteur entraîne un ensemble de symptômes que l'on retrouve lors du vieillissement ou d'un alitement prolongé, ce qui prédispose à la survenue de certaines pathologies et réduit la réserve physiologique en cas d'affections médicales ou traumatiques. Même la régulation et l'expression génique sont modifiées, comme cela a été constaté lors de la remarquable *twins study* (voir la photo page 50).

Pour protéger la santé des astronautes dans cet environnement exceptionnel et loin des





centres hospitaliers, les agences spatiales et leurs départements médicaux ont mis en place une stratégie de réduction des risques reposant sur trois piliers: la prévention, les contre-mesures et l'autonomie médicale à bord.

Parmi les mesures préventives, la sélection drastique de sujets jeunes en excellente forme physique et mentale exclut certains risques de décompensation, c'est-à-dire la dégradation, d'un état pathologique chronique sous-jacent lors de la mission (comme une épilepsie, un asthme ou une insuffisance cardiaque). Une fois le recrutement effectué, une équipe médicale suit les astronautes pendant toute la phase de préparation qui précède leur mission. Les protocoles sont standardisés, et comprennent des tests d'effort, un contrôle de densité osseuse, des examens ophtalmologiques et audiométriques. Ils garantissent l'absence de pathologie avant le départ et serviront de données de référence pour la surveillance après le vol. Un confinement de quatorze jours imposé avant le décollage réduit le risque d'importer dans la station une pathologie infectieuse en phase d'incubation. Tout symptôme suspect entraîne l'exclusion de l'astronaute par précaution pour sa santé et celles de ses collègues. Un cas célèbre est celui

### CHUTE LIBRE PERMANENTE

Contrairement à ce qu'on croit parfois, la Station spatiale internationale est bien soumise à la gravité terrestre (son intensité à 400 kilomètres d'altitude est d'environ 88 % de celle au niveau de la mer). La station ne s'écrase pas pour autant grâce à sa grande vitesse orbitale (28 000 kilomètres par heure) annulant l'effet de la pesanteur. Elle est donc, avec ses occupants, en chute libre permanente, faisant le tour de la Terre en 90 minutes. Mais s'il est spectaculaire de voir les astronautes flotter dans l'ISS, l'impesanteur est un vrai problème pour leur santé.

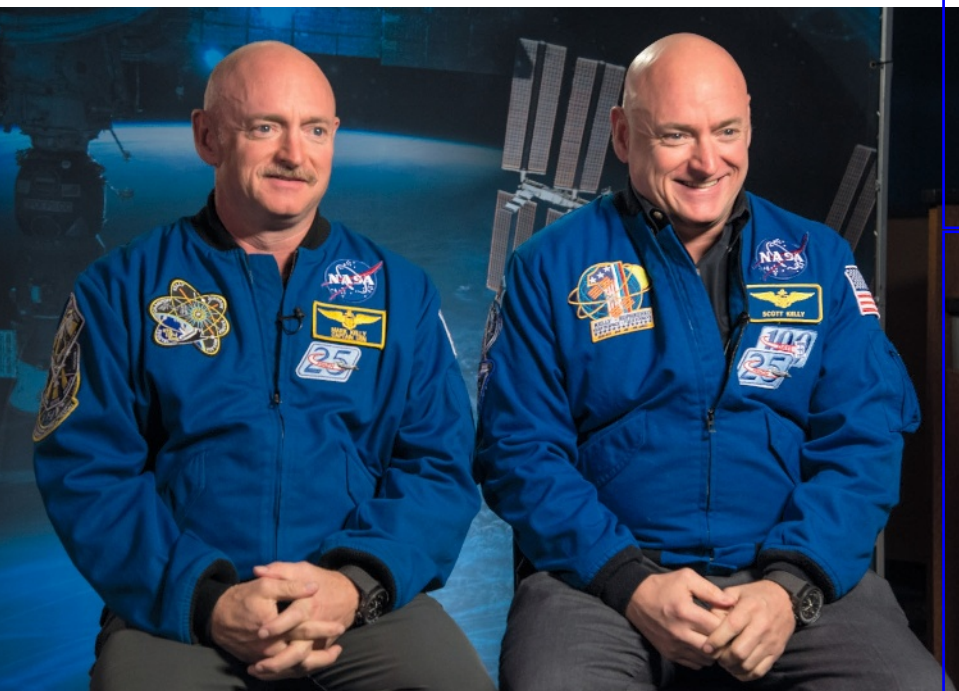
de Ken Mattingly, écarté de la mission *Apollo 13* en raison d'une suspicion de rubéole quelques jours avant le décollage.

Autre exemple de prévention, la surveillance étroite de l'environnement de l'ISS par le biais de l'EHS (Environmental Health System). Ce dispositif, constitué d'une multitude d'appareils de mesure, détecte d'éventuelles contaminations microbiologiques de l'eau ou des surfaces de la station. La qualité de l'atmosphère de la Station est également scrutée, afin d'avertir de la présence de gaz toxiques tel le formaldéhyde ou le monoxyde de carbone. Enfin, des dosimètres permettent de surveiller le risque radiatif, comme pour les travailleurs terrestres exposés à des rayonnements ionisants, au sein des centrales nucléaires ou des services de radiologie médicale.

En complément de ces mesures préventives viennent les contre-mesures. Ce terme définit l'ensemble des actions mises en place pour limiter l'impact physiologique ou psychologique d'une variable non contrôlable, comme l'impesanteur ou le confinement. Ainsi, pour faire face au déconditionnement musculaire causé par les vols spatiaux, les astronautes doivent s'astreindre à deux heures et demie de sport quotidiennes. L'ISS est ainsi équipée de différents appareils: tapis de course avec harnais, cycloergomètre («vélo d'appartement») ou encore l'Ared, pour *advanced resistive exercise device*, un appareil de musculation adapté à l'impesanteur. D'autres contre-mesures nutritionnelles, comme l'apport de polyphénols, sont à l'étude pour maintenir la masse musculaire lors de missions spatiales.

Ces deux premières lignes de protection (prévention et contre-mesures) sont efficaces et représentent la majeure partie de la stratégie de gestion des risques lors d'une mission en orbite terrestre basse. Malheureusement, dans cet environnement dangereux, la probabilité de se blesser ou de tomber malade ne peut jamais être totalement écartée. Certaines projections statistiques estiment que le risque de survenue d'un événement médical ou traumatique sérieux à bord d'une station orbitale pour une mission de six mois se situe entre 1 et 17% par personne. L'exploration spatiale est d'ailleurs jalonnée d'antécédents médicaux. Avant la mise en service de l'ISS, entre 1961 et 1999, on dénombre dans la littérature 17 événements médicaux graves à bord d'un vaisseau en orbite, dont quatre ont nécessité une évacuation vers la Terre. Troubles du rythme cardiaque, infection urinaire sévère, céphalées rebelles aux traitements antalgiques ont ainsi conduit les responsables de vol à abréger la mission plutôt que de risquer l'impasse thérapeutique au sein du vaisseau.

La troisième ligne de défense correspond donc à la dotation de capacités opérationnelles médicales et chirurgicales au sein de



Les astronautes, et jumeaux homozygotes (au patrimoine génétique identique), Scott et Mark Kelly ont participé à la *twins study* de la Nasa. Entre le 27 mars 2015 et le 1<sup>er</sup> mars 2016, Scott a passé 340 jours à bord de l'ISS pendant que Mark est resté sur Terre. L'analyse comparative des frères a permis d'étudier les effets d'un vol longue durée dans l'espace. De nombreuses fonctions biologiques ont été perturbées lors de la mission. La majorité d'entre elles sont revenues à la normale après le retour sur Terre: régulation et expression génétique et épigénétique, longueur des télomères, masse corporelle (perte de 7%), composition du microbiote intestinal. D'autres fonctions ont été altérées par le stress du retour sur la planète comme le système immunitaire et les performances cognitives. Quelques-uns de ces changements ont persisté encore six mois après la fin de la mission.

l'ISS, afin de rendre l'équipage le plus autonome possible face aux différents imprévus de santé. C'est le rôle du Health Maintenance System, qui regroupe à bord de l'ISS plus de 190 produits pharmaceutiques, organisés en kits médicaux adaptés au degré d'urgence et ciblant les pathologies à plus forte probabilité d'incidence. Par exemple, les affections bénignes qui ne présentent pas de risque d'aggravation secondaire sont facilement traitées grâce au kit «ambulatoire», assez bien fourni pour les petits maux du quotidien (mal de l'espace et nausées, constipation, petites brûlures, etc.). La station est équipée d'échographes dont les images sont d'une grande aide diagnostique dans la détection de nombreuses pathologies.

## DES BACTÉRIES AGRESSIVES

Les astronautes disposent également d'une large gamme d'antibiotiques pour traiter par exemple des infections bactériennes pulmonaires ou urinaires. Cependant, dans l'espace, le risque infectieux est accentué par la combinaison de plusieurs facteurs. À cause de l'environnement clos et confiné, la transmission interhumaine d'agents pathogènes est facilitée. Or les défenses immunitaires des astronautes sont affaiblies, probablement en raison du stress de la mission, de la perturbation du sommeil et des rythmes circadiens, de l'environnement radiatif et d'une alimentation aux apports nutritionnels limités. Enfin, différentes études, comme celle menée en 2013 par Elisabeth Grohmann, de l'université technique de Berlin, ou celle en 2020 conduite par Sharmila Bhattacharya, de la Nasa, suggèrent que les conditions de la station spatiale (environnement clos, artificiel et hypobare) seraient propices à l'émergence de bactéries plus résistantes aux traitements (par la formation de biofilms bactériens qui entravent la pénétration et l'efficacité des antibiotiques), voire parfois même plus virulentes.

À cela, il faut ajouter que l'environnement spatial radiatif accélère la dégradation des principes actifs médicamenteux, pouvant les rendre inefficaces sur le long terme, posant des problématiques de péremption sur les vols longue durée, notamment pour des vols vers Mars, où un ravitaillement en cours de mission est impossible. Certaines équipes travaillent à la conception de conditionnements isolant les médicaments des rayons cosmiques. D'autres, comme Karen McDonald, de l'université de Californie à Davis, visent à doter la station de capacités de production médicamenteuse *in situ*... grâce à la culture de laitues modifiées par génie génétique!

Enfin, en dernier recours en cas d'accident grave, le kit médical avancé de support de vie (*advanced life support pack*) est équipé



pour répondre aux premiers instants d'une urgence médicale avec un défibrillateur, du matériel pour procéder à une intubation trachéale, un respirateur sommaire, ainsi que des médicaments permettant les premières étapes d'une réanimation comme l'adrénaline ou l'atropine.

Manier ce matériel et ces procédures de soin nécessite des compétences et des précautions. Lorsqu'un astronaute est lui-même issu du corps médical, il est naturellement désigné référent des soins à bord. Mais la plupart du temps, cette responsabilité revient à un astronaute qui n'est pas médecin et qui aura bénéficié d'une dizaine d'heures de formation en premiers secours. Dénommé *crew medical officer* (CMO), il doit être capable d'effectuer des gestes techniques aussi variés

À bord de la Station spatiale internationale, tous les astronautes doivent s'astreindre à 2,5 heures de sport par jour, à l'image de Thomas Pesquet, ici sur le cycloergomètre.



## ADAPTER LES PROCÉDURES D'URGENCE TERRESTRE AU MILIEU SPATIAL : L'EXEMPLE DE L'INTUBATION TRACHÉALE



Essai d'intubation sur mannequin en approche dite « au piolet ». L'impesanteur exige de modifier l'approche ergonomique de nombreuses procédures médicales d'urgence.

**L'**intubation trachéale est un geste d'urgence permettant de sécuriser et contrôler les apports en oxygène (en volume, en fréquence et en fraction inspirée) d'un patient en état critique. Cette procédure invasive est indiquée chez des patients dont la commande ventilatoire au niveau du tronc cérébral est abolie (suite à une perte de conscience, après un arrêt cardiaque ou un traumatisme crânien sévère, par exemple). Elle peut aussi se révéler nécessaire quand les poumons ne sont plus capables d'assurer correctement leur fonction d'échange gazeux, lorsque la membrane alvéolocapillaire pulmonaire est lésée, par exemple, comme c'est le cas chez certains patients du Covid-19, et aurait pu l'être chez les astronautes de la station *Mir* lors de l'incendie de 1997. Cette procédure, déjà risquée en conditions normales, est d'autant plus complexe dans l'espace. Le soignant subit les effets néfastes de l'impesanteur, comme la difficulté à se stabiliser ou les perturbations de son système sensorimoteur et vestibulaire (oreille interne). Comment adapter le protocole à cet environnement ? Grâce aux campagnes de vols paraboliques du Cnes, notre équipe de recherche a étudié

en « condition spatiale » l'intubation trachéale à bord de l'Airbus A310 Zéro-G, exploité par Novespace. Cet avion-laboratoire plonge ses passagers dans un état d'impesanteur semblable à celui présent à bord de l'ISS grâce à un pilotage singulier plaçant l'avion en trajectoire parabolique. Chaque vol offre 30 paraboles aux scientifiques et chaque parabole présente 22 secondes d'impesanteur. Lors de ces vols, nous avons étudié sur un mannequin haute-fidélité des nouveaux dispositifs d'intubation vidéoassistés, préalablement validés en médecine terrestre. Ces « vidéolaryngoscopes » permettent un retour sur écran des cordes vocales, assurant un meilleur contrôle du geste malgré le flottement de l'opérateur. L'expérience a montré un gain de performance par rapport aux dispositifs d'intubation présents actuellement à bord de l'ISS, ce qui pourrait valider leur présence au sein de futures trousse médicale d'urgence spatiale. Cependant, même si nos données montrent que ces nouveaux outils facilitent l'intubation en impesanteur, de nombreuses difficultés persistent pour sécuriser l'ensemble de la prise en charge d'une urgence respiratoire à l'échelle

spatiale. Les complications associées à l'intubation sont potentiellement graves, voire mortelles, comme lorsque l'on ne détecte pas un mauvais positionnement de la sonde dans l'œsophage au lieu de la trachée. Cette procédure nécessite aussi le plus souvent une sédation du patient à l'aide de médicaments dangereux à manier en l'absence d'expertise ou de suivi adapté. Et même si l'intubation est réussie, il faut ensuite régler correctement le respirateur artificiel qui, en amont de la sonde, délivre les volumes et les pressions respiratoires adéquats au patient, ces réglages étant eux-mêmes source d'accidents. Effectuer ce geste dans une station spatiale regroupe tous les facteurs de risque d'échec et soulève donc des interrogations légitimes sur l'accès à cette technique en milieu isolé, sans mentionner les problématiques de réserve d'oxygène et de médicaments nécessaires au soutien de la fonction respiratoire. Le débat en médecine spatiale reste ouvert.

que des sutures, des interventions dentaires ou un sondage urinaire.

En complément, les astronautes bénéficient d'une surveillance et d'une assistance depuis le sol grâce aux *flight surgeons* (médecins affectés aux vols), spécialistes en médecine aérospatiale. Depuis les centres de contrôle terrestres, ils analysent en continu les paramètres physiologiques des astronautes et leur prodiguent une téléassistance en cas de besoin. Un suivi régulier médical et psychologique permet d'apporter des conseils de santé et de gérer des affections mineures à l'aide de la pharmacie de bord.

Un chiffre illustre la réussite et la robustesse des stratégies de contrôle du risque médical en orbite terrestre basse: aucune évacuation pour raison de santé n'a été nécessaire à bord de l'ISS depuis le début de son occupation en 2000! Cette donnée vient pour le moment contredire les projections statistiques, initialement plus pessimistes.

Ce succès ne doit pas masquer le fait que chaque ligne de défense (prévention, contre-mesures et autonomie) possède ses limites. Certains exemples de points de fragilité techniques et stratégiques concernant l'autonomie médicale à bord de l'ISS laissent entrevoir les immenses difficultés et dilemmes médicaux soulevés par la perspective de missions plus lointaines, comme un vol vers Mars.

Dans une station conçue pour six personnes, il est impossible d'espérer trouver un plateau technique de soins complets pour des questions de charge utile, de volume, de coût, de compétences et de ressources humaines. L'ISS n'est pas équipée pour du soin intensif lourd et prolongé. Il faut donc faire des compromis en ciblant l'offre de soin vers les pathologies à plus forte probabilité d'incidence. Ces pathologies sont soit conventionnelles survenant spontanément pendant le vol sans lien avec la mission (comme un abcès dentaire), soit circonstancielles, c'est-à-dire favorisées ou engendrées par l'exposition à l'une des nombreuses contraintes du milieu spatial. Cependant, en cas d'accident grave, les options de traitement seraient rapidement dépassées. La station ne possède ni produit sanguin labile (culots de sang, dans le cadre d'une transfusion par exemple) ni matériel chirurgical lourd pour réaliser une intervention digestive ou vasculaire urgente, ni le personnel nécessaire pour gérer le nombre élevé de tâches critiques imposées par la prise en charge d'un blessé grave. Parmi les pistes de recherche pour renforcer l'autonomie médicale en milieu spatial, la Nasa a par exemple testé dans l'ISS un générateur de sérum physiologique (nommé IVGEN). Ce soluté de première nécessité permet de préparer des médicaments et d'hydrater par voie intraveineuse des patients gravement malades.

Une autre difficulté concerne la séparation géographique entre l'équipage isolé dans l'espace et un expert médical au sol. Cette configuration rend plus complexe l'assistance médicale pour de multiples raisons. Des pertes de signal régulières interrompent souvent le lien audio et vidéo entre la Terre et l'ISS, gênant la transmission d'informations. En cas de situation médicale critique à bord, l'évaluation de la situation risquerait d'être confuse de part et d'autre, l'urgence étant source d'erreurs d'interprétation et de biais cognitifs, comme en témoigne le difficile exercice de régulation médicale au sein des Samu. La différence de langue maternelle entre intervenants entrave les échanges. Dans le cas d'un voyage vers Mars, cette option de coopé-

## L'évacuation vers la Terre présente parfois davantage de risques pour le blessé

ration à distance serait fortement affectée, voire inutile: les communications radio seront soumises à une telle latence (parfois plus de vingt minutes dans chaque sens) qu'il sera impossible d'interagir en temps réel lors d'une urgence. Certaines équipes de recherche, dont la nôtre (avec le Centre européen de réalité virtuelle de Brest), travaillent ainsi sur des projets d'aide à la décision médicale et à la perception du risque (côté astronaute) en utilisant différentes technologies comme l'intelligence artificielle, les agents conversationnels (*chatbots*) et la réalité augmentée.

Mais revenons à bord de l'ISS. Pourrait-on simplement, en cas de symptôme menaçant, opter pour une évacuation médicale? Après tout, les capsules *Soyouz* ou *Crew Dragon*, arrimées à la station, permettent un retour en quelques heures sur Terre. Le temps maximal entre une décision d'évacuation et une admission en centre hospitalier est estimé à une trentaine d'heures. Ainsi, l'équipage à bord d'une station orbitale est plus proche d'un centre hospitalier moderne que certains navigateurs ou les scientifiques en hivernage en Antarctique. Pour ces derniers, l'évacuation prend jusqu'à plusieurs jours, voire se





révèle impossible en raison de conditions météorologiques.

Cet avantage est toutefois contrebalancé par de nombreuses difficultés, limitant l'option de l'évacuation médicale. Impossible par exemple d'envisager à ce jour un transfert d'astronaute nécessitant des soins critiques entre l'ISS et la Terre, sur le modèle des évacuations interhospitalières mises en lumière par la pandémie de SARS-CoV-2. Ce type de transfert de patients intubés, ventilés et sous sédatif nécessite une logistique lourde, en termes de matériel thérapeutique (perfusions, pousse-seringues, respirateur relié au patient par une sonde d'intubation), de surveillance (moniteur), de personnel. Il n'est tout simplement pas possible de faire entrer autant de matériel de soin dans une capsule au vu de son étroitesse.

Pour l'ISS, la décision d'une éventuelle évacuation médicale encourt donc deux écueils stratégiques. Le premier serait d'évacuer inutilement, à coût élevé, une pathologie bénigne qui aurait pu être traitée avec la pharmacie de bord. À l'inverse, il serait catastrophique de sous-estimer la gravité initiale ou

Les astronautes s'entraînent à réaliser un massage cardiaque. Différentes méthodes ont été proposées et comparées. Pour maintenir le contact entre le soignant et le patient, certaines approches consistent à retenir le malade avec ses jambes, d'autres utilisent des sangles pour s'arrimer au sol. Mais la méthode qui semble la plus efficace est celle du poirier, illustrée sur la photo.

potentielle (en cas d'évolution défavorable) d'une affection, de manquer la fenêtre temporelle optimale pour évacuer, puis de se retrouver à court d'options thérapeutiques au sein de la station.

Un incident survenu il y a quelques années dans l'ISS résume ces difficultés. Un membre d'équipage participait à une étude échographique sur la paroi des vaisseaux sanguins. Lors d'un examen dans le cadre de cette expérience, l'équipe a découvert fortuitement une thrombose de sa veine jugulaire interne. L'impensable est en effet un facteur de risque pour la formation de ces caillots sanguins, la stagnation du flux veineux sanguin favorisant l'hypercoagulabilité, comme lors d'un alitement prolongé. Cette thrombose était problématique. Certes, l'astronaute ne présentait aucun symptôme de mauvaise tolérance. Mais l'éventuel détachement de ce caillot de la paroi du vaisseau aurait probablement entraîné une grave embolie pulmonaire, responsable d'une défaillance cardiaque possiblement fatale.

Les médecins de vol étaient donc face à une situation délicate. Fallait-il opter pour la

stratégie «charger et foncer» (*scoop and run*), consistant à évacuer un patient à risque de décompensation le plus vite possible vers un centre de référence, avec un traitement correctif léger lors de la prise en charge? Ou devait-on choisir la stratégie inverse, *stay and play* (littéralement «rester et jouer»), plus interventionniste, et déplaçant des moyens médicaux au plus près du patient afin de le stabiliser avant un hypothétique transport?

Dans le cas présenté, la décision a été prise de garder l'astronaute en vol: un traitement anticoagulant permettant de limiter l'extension du caillot a été commencé à bord avec la petite réserve de la pharmacie. Grâce aux ravitaillements par cargo spatial vers la station, le traitement a été maintenu jusqu'à la fin de la mission, et aucune complication n'a été détectée lors de la surveillance échographique régulière. Les médecins des vols ont donc opté pour un compromis entre les deux stratégies pré-hospitalières. Cependant, plus l'éloignement de la Terre sera grand, plus la méthode *stay and play* deviendra la seule option possible. Le ravitaillement médicamenteux ou le renfort humain sera compliqué, voire impossible, en cas de mission sur le sol martien.

## L'IMPESANTEUR SIMULÉE

La médecine spatiale reste un champ de recherche très ouvert, dont les problématiques évoluent avec la perspective de missions lointaines ou d'une ouverture au tourisme. Pour approfondir nos connaissances dans ce domaine, l'ISS demeure, bien sûr, un laboratoire clé consacré à la science en impesanteur. Mais d'autres approches permettent de simuler (au moins en partie) ces conditions si particulières: les vols paraboliques en avion (voir l'encadré page 52) ou les études en immersion sèche. Ces dernières sont notamment réalisées au Medes, l'Institut de médecine et physiologie spatiale, à Toulouse, un établissement de référence en physiologie et médecine aérospatiale. L'immersion sèche reproduit les effets de l'impesanteur en immergeant un sujet (isolé de l'eau par une grande toile imperméable) dans une grande baignoire. Cette configuration mime les effets de l'impesanteur en supprimant les points d'appuis, afin d'étudier par exemple les nombreux effets musculaires ou cardiaques associés.

La médecine terrestre bénéficie aussi de cette activité de recherche. Par exemple, le laboratoire Comete, de l'université de Caen, ou le Caps (Cognition, action et plasticité sensorimotrice), de l'université de Bourgogne, pour ne citer qu'eux, orientent une partie de leurs recherches vers la médecine spatiale. En effet, le handicap moteur, l'alitement prolongé des patients hospitalisés, ou encore les pathologies de l'oreille interne par exemple présentent des

# La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe

analogies avec les modifications physiologiques induites par l'absence de pesanteur.

Le champ de la télémedecine bénéficie également de l'activité spatiale. À titre d'exemple, en 2017, lors de la mission *Proxima*, l'astronaute Thomas Pesquet a participé à la mise en service d'un échographe téléopéré (*Echo*). Depuis le sol, un médecin peut à présent téléguider une sonde d'échographie présente à bord de l'ISS. Sur Terre, grâce à cette technologie, un expert intervient directement auprès d'un patient à distance et contrôle en temps réel la qualité des images recueillies, améliorant la performance diagnostique de l'examen. Citons aussi le maillot de corps développé par l'Agence spatiale canadienne, nommé «biomonitor», qui enregistre les signes vitaux de l'astronaute sans être invasif. Les nouvelles technologies comme la réalité augmentée, l'intelligence artificielle pour le support décisionnel, ou l'impresion 3D pour le matériel médical offrent également des perspectives intéressantes d'assistance au soin en milieu isolé.

Jusqu'à présent, une collaboration étroite entre programmeurs de mission, ingénieurs, chercheurs, instructeurs d'astronautes et médecins du spatial a permis de minimiser les risques médicaux au sein des stations orbitales et d'établir des standards de sécurité élevés pour les astronautes. La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe. Aux questions techniques viendront invariablement s'ajouter des interrogations éthiques en cas de pathologie grave nécessitant des ressources au-delà de celles disponibles. Dans une petite station sur la Lune ou sur Mars sans ravitaillement ni renfort ou évacuation immédiate possible, la probabilité de survie serait alors très faible. Néanmoins, certaines avancées technologiques fourniront peut-être des solutions pour accroître la sécurité lors de ces missions qui repoussent les limites de l'exploration. D'ambitieux projets de recherche vont jusqu'à envisager la piste de l'hibernation humaine. ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Komorowski et al., **On the challenges of anesthesia and surgery during interplanetary spaceflight**, *Anesthesiology*, 2021.

J. Hinkelbein et al., **Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight-a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine - Space Medicine Group (ESAM-SMG)**, *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine*, 2020.

M. A. Custaud et al. (éd.), **L'Humain et l'Espace**, Books on Demand, 2020.

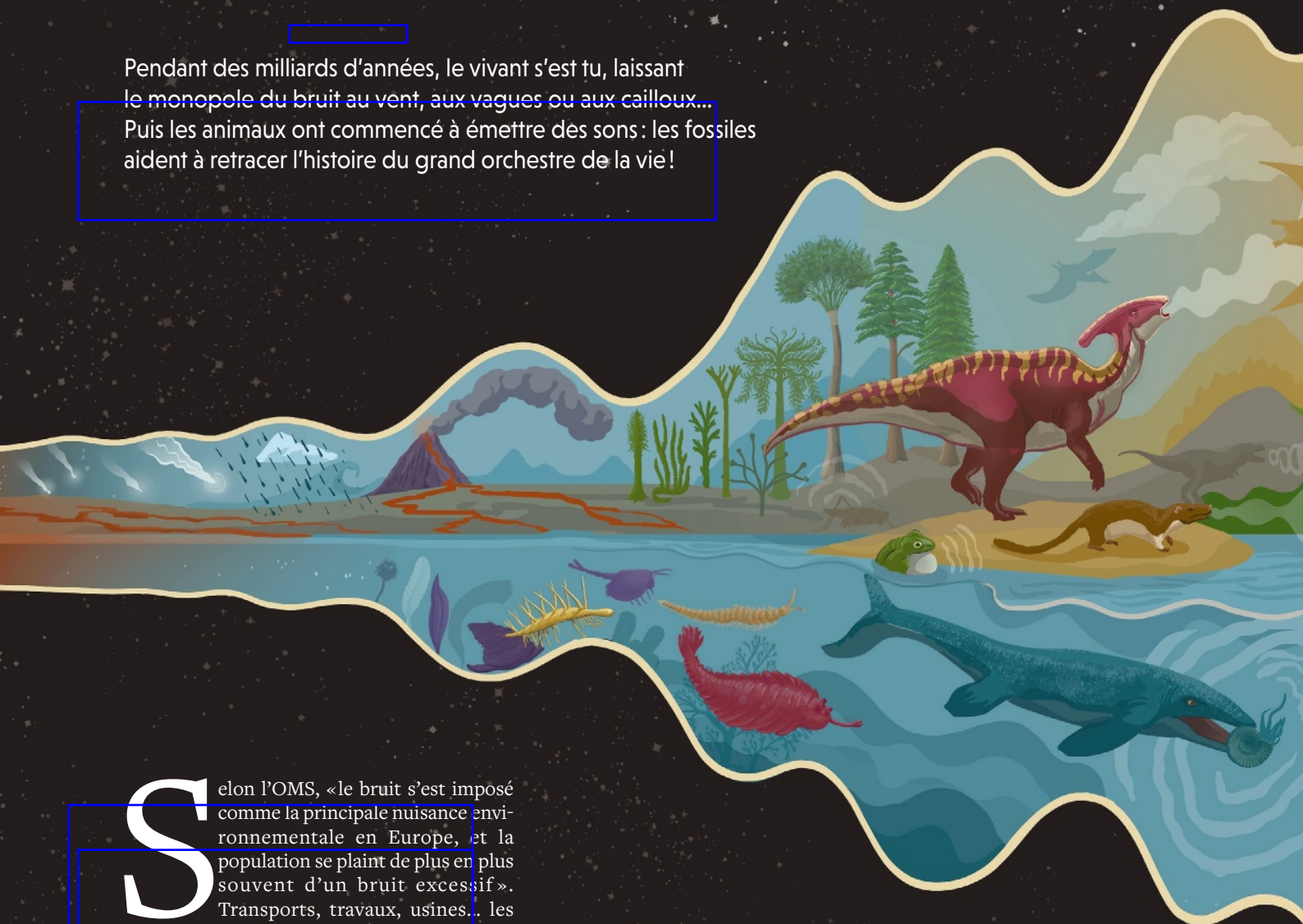
N. Pattyn et P. F. Migeotte, **Vivre dans l'espace**, *Pour la Science*, n° 422, 2012.



# L'éveil des sons

Michael Habib

Pendant des milliards d'années, le vivant s'est tu, laissant le monopole du bruit au vent, aux vagues ou aux cailloux... Puis les animaux ont commencé à émettre des sons : les fossiles aident à retracer l'histoire du grand orchestre de la vie !



**S**elon l'OMS, «le bruit s'est imposé comme la principale nuisance environnementale en Europe, et la population se plaint de plus en plus souvent d'un bruit excessif». Transports, travaux, usines... les sources de bruit sont omniprésentes sur la Terre, où résonne une cacophonie d'origine humaine. Notre espèce est à n'en point douter l'une des plus émettrices de sons par les machines qu'elle a inventées. Pour preuve, lors du confinement du début 2020, quand plusieurs milliards d'individus ont été sommés de rester chez eux, la nature a, un peu, repris ses droits, et les témoignages émerveillés se sont succédé pour décrire, par exemple, le plaisir d'entendre à nouveau les oiseaux ou les grenouilles. C'est que des insectes aux baleines, beaucoup d'espèces animales produisent des sons et l'on pourrait croire qu'il en a toujours été ainsi. Il n'en est rien : pendant la majeure

partie de son histoire, notre planète n'a laissé entendre que le vent, la pluie, les vagues... le vivant restait silencieux.

Jé suis paléontologue, et mon travail consiste à comprendre la vie des animaux disparus. À ce titre, je suis également consultant pour des expositions, des films et des jeux. Parmi les sujets que je suis amené à traiter, les plus fréquents ont trait aux sons des animaux. Qu'il s'agisse d'une étude universitaire ou d'un *blockbuster*, le son est essentiel pour donner vie à des mondes disparus ou imaginaires.

De récentes études sur l'évolution de l'acoustique animale ont révélé comment sont

La musique a été un moteur de l'évolution, tant émettre et percevoir des sons apporte de nombreux avantages.







## L'ESSENTIEL

> Pendant des milliards d'années, les animaux sont restés silencieux, incapables de produire le moindre son.

> Cela change avec les premiers arthropodes, marins ou terrestres, capables, par exemple, de stridulation, pour la famille des sauterelles, et de cymbalisation, pour celle des cigales.

> Les vertébrés, comme les reptiles et les mammifères, ne sont pas en reste et se dotent d'un larynx dont

les chauves-souris et les cétacés font un usage particulier : l'écholocalisation.

> Autre cas à part dans l'évolution des sons, les oiseaux, quant à eux, acquièrent en plus une syrinx, adaptée à l'émission de chants complexes.

> Dernière étape dans cette histoire du son, notre espèce a développé le langage articulé, pilier indispensable à l'émergence de toute notre civilisation.

## L'AUTEUR



**MICHAEL HABIB** est paléontologue, spécialiste de l'anatomie et du mouvement des ptérosaures, des oiseaux et des dinosaures à plumes, ainsi que biomécanicien au Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles.

apparus nos paysages sonores actuels. Plus précisément, les fossiles documentent l'apparition des principaux types de structures de production et de détection du son chez les ancêtres des espèces actuelles. Et, parfois, grâce à des modélisations, les scientifiques recréent les anciens sons eux-mêmes. Désormais, nous avons une idée de l'aube du vacarme.

## DU MONDE DU SILENCE À MARIAH CAREY

Les archives fossiles indiquent que la vie sur Terre a commencé il y a 3,7 milliards d'années. Mais les premiers organismes, les microbes et, beaucoup plus tard, des animaux à corps mou, étaient muets. Ce n'est qu'au cours de l'explosion évolutive du Cambrien, il y a entre 541 et 485,4 millions d'années, que les animaux ont commencé à faire du bruit, du fait de comportements liés à la locomotion et à la prédation. Mais ces sons restaient limités au milieu sous-marin... Aucun son animal ne résonnait sur la terre ferme. Plus de 200 millions d'années se sont écoulées avant que le bourdonnement des insectes ne commence à remplir l'air, donnant naissance à un monde acoustique entièrement nouveau.

Le plus ancien insecte putatif connu (on n'en a qu'une mandibule, découverte en Écosse), date d'environ 400 millions d'années, et l'on ignore s'il était muet, voire sourd. Quand les insectes ont-ils commencé à émettre ou entendre des sons? Difficile de répondre, mais les archives fossiles fournissent une date minimale: une espèce de la famille des Tettigoniidae (celle des sauterelles) datant d'environ 250 millions d'années présente l'anatomie productrice de sons caractéristique de ce groupe: leur stridulation résulte du frottement de « râpes » situées sur les ailes. Ces structures sont si bien conservées dans certains fossiles que l'on sait reconstituer les sons qu'émettaient ces créatures. C'est ce qu'a fait en 2012 une équipe dirigée par Jun-Jie Gu,

aujourd'hui à l'université agricole du Sichuan, en Chine, en montrant qu'*Archaboilus musicus* (un Tettigoniidae) émettait il y a 165 millions d'années des sons à une fréquence de 6,4 kilohertz, soit environ un *sol* de la septième octave, note que seuls de rares chanteurs, notamment Mariah Carey peuvent atteindre.

Les plus anciens fossiles connus de cigales datent également de cette époque. Ces insectes produisent des sons parfois exceptionnelles

# On peut reconstituer les sons émis par les créatures aux fossiles les mieux conservés

ment forts grâce à la cymbalisation, qui consiste en des déformations rapides d'une membrane (un peu comme le couvercle d'un bidon) par des muscles, le son étant ensuite amplifié dans une caisse de résonance (voir l'encadré page ci-contre).

Pour ces premiers insectes, les avantages à sortir du monde du silence étaient nombreux: communiquer à distance, entendre des prédateurs et peut-être même attirer des proies en imitant les sons d'un partenaire potentiel de l'animal cible, comme le fait *Chlorobalius leucoviridis* (un Tettigoniidae australien) pour attirer des cigales mâles en imitant le chant des femelles. En offrant également un nouveau

moyen d'attirer les partenaires, le son donna lieu à un nouveau type de bataille évolutive, celle privilégiant celui qui ferait le plus de bruit.

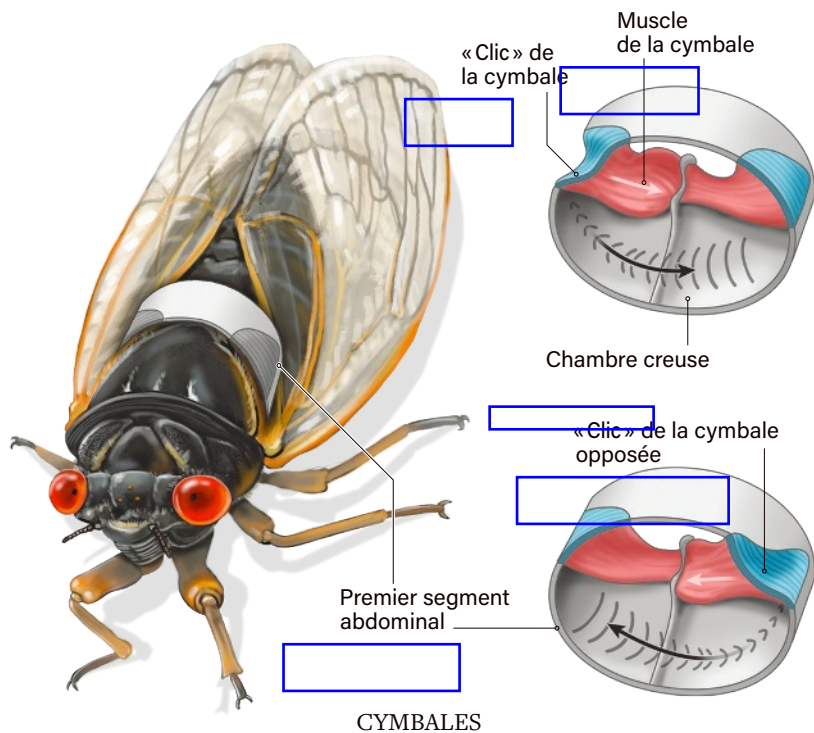
## LES PREMIÈRES « BOÎTES VOCALES »

Les vertébrés ont probablement commencé à expérimenter le son, sous une forme limitée, à peu près au même moment où les insectes se sont fait entendre. Les amphibiens, les reptiles et les mammifères d'aujourd'hui possèdent tous un larynx (voir l'encadré page suivante), une « boîte vocale » située au sommet des voies respiratoires. De cette présence dans des groupes aussi éloignés, on déduit qu'ils l'ont héritée de leur dernier ancêtre commun. En d'autres termes, le larynx serait presque aussi vieux que les vertébrés terrestres eux-mêmes, et remonterait donc à environ 300 millions d'années. Cependant, il a probablement fallu des millions d'années pour que des sons dignes de ce nom, spécialisés ou puissants, se développent chez ces animaux, le temps qu'un larynx suffisamment performant se mette en place.

On sait peu de chose sur les premiers stades de la vocalisation des vertébrés, notamment parce que le larynx est constitué de cartilage, qui se conserve généralement mal. Une chose est néanmoins sûre, à partir de 230 millions d'années environ, au cours du Mésozoïque (cette ère, qui réunit le Trias, le Jurassique et le Crétacé, s'étend entre 252,2 et 66 millions d'années), les vertébrés ont acquis un large éventail de capacités vocales. C'est à ce moment-là que le monde est devenu vraiment bruyant. Les grenouilles, avec leur riche répertoire de cris et de chants, sont apparues durant cette période. Les mammifères ont également fait leurs débuts à cette époque, et ont probablement fait entendre très tôt leurs grognements et sifflements caractéristiques. Nous n'avons pas beaucoup de témoignages directs de l'appareil de production du son chez les premiers mammifères, mais nous disposons d'un riche registre fossile de leurs... oreilles.

L'oreille des mammifères est unique, avec ses trois petits osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) dans l'oreille moyenne, dont les deux derniers sont dérivés d'os associés à la mâchoire chez la plupart des autres vertébrés. Ces oreilles spéciales sont très efficaces pour entendre les sons à haute fréquence, ce qui aurait pu aider les mammifères à repérer des proies parmi les insectes bourdonnants. Ces mammifères étaient peut-être aussi capables de produire des sons à haute fréquence, afin de communiquer dans une gamme de fréquences que peu d'autres animaux pouvaient détecter.

Les dinosaures sont parmi les animaux du Mésozoïque les plus doués pour l'acoustique. En 1981, David Weishampel a été le premier à reconstituer la vocalisation d'un animal fossile,



Les insectes comme les cigales « chantent » en utilisant des cymbales, des structures ressemblant à des membranes de tambours déformées par les contractions rapides de muscles spécifiques. S'ensuit une série de cliquetis (plusieurs centaines par seconde) qui sont amplifiés dans l'abdomen doté d'une chambre de résonance dans ses premiers segments. Les archives fossiles montrent que ces organes sonores existent depuis au moins 250 millions d'années.

en l'occurrence le dinosaure herbivore à bec de canard *Parasaurolophus*. Cette créature avait sur la tête une crête géante reliée à ses voies respiratoires qui faisait office de chambre de résonance. En prenant en compte la taille et la forme de la crête, le paléontologue a pu estimer le répertoire sonore du *Parasaurolophus* et le reproduire avec un modèle : les sons ressemblaient à ceux d'un didgeridoo !

## LE KLAXON DU T. REX

Depuis l'avènement des outils numériques, toujours plus performants, ce type d'analyse approfondie a été mené sur un nombre beaucoup plus important de spécimens. Depuis 2008, Lawrence Witmer, de l'université de l'Ohio, et son équipe utilisent des scanners, ainsi que des modèles de mécanique des fluides, pour étudier la production de sons chez diverses espèces de dinosaures. Ils ont découvert que le crâne de plusieurs d'entre elles contenait des chambres complexes où la circulation de l'air contribuait à la régulation de la température du corps, mais vraisemblablement aussi à l'émission d'un large éventail de sons, ressemblant notamment à ceux des klaxons, des soufflets et des trompettes.

La reconstitution des vocalisations des dinosaures, comme celles entendues dans les films de la franchise *Jurassic Park*, est



depuis longtemps prisée par l'industrie cinématographique. Mais Julia Clarke, de l'université du Texas, à Austin, et ses collègues ont montré que les sons des dinosaures prédateurs, au premier rang desquels le *Tyrannosaurus rex*, s'apparentaient davantage au répertoire des oiseaux qu'au rugissement des mammifères. Les sons du *T. rex* étaient-ils ceux d'une oie géante? D'un point de vue biomécanique, le «klaxon» est un son produit en grande partie par le nez plutôt que par la bouche et commençant par la vibration de structures situées profondément dans la poitrine. À l'échelle du tyrannosaure, cela devient une trompette de guerre baryton-basse équivalente en puissance à toute la section des cuivres d'un orchestre philharmonique!

Cependant, certains de ces reptiles géants étaient probablement un peu moins bruyants qu'on ne l'imagine. Les brachiosaures à long cou, qui jouent de la trompette comme des éléphants dans le premier *Jurassic Park*, sorti

en 1993, étaient en réalité probablement presque aphones. Tout au plus étaient-ils capables de siffler. Chez tous les tétrapodes (le groupe des premiers vertébrés terrestres et leurs descendants), les vocalisations primaires du larynx sont contrôlées principalement par le nerf laryngé récurrent. Ce nerf présente toujours la même configuration étrange: asymétrique, dans sa partie droite, il descend le long du cou, contourne les gros vaisseaux sanguins de la partie supérieure et moyenne de la poitrine, puis remonte le cou jusqu'au larynx, tandis qu'à gauche il commence dans le thorax et remonte vers la trachée. En conséquence, les signaux nerveux de la voix doivent parcourir environ deux fois la longueur du cou.

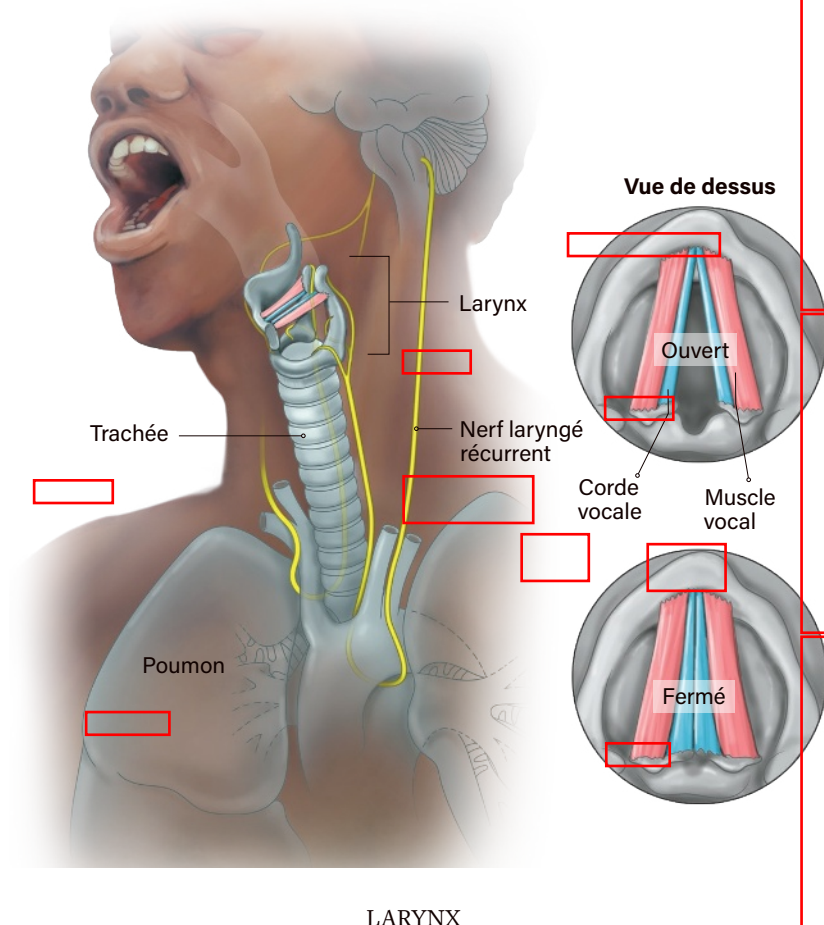
### UN « MONUMENT D'INEFFICACITÉ »!

Pour les animaux à cou court, notamment les humains, le retard qui en résulte est insignifiant, mais pour ceux à long cou... Déjà, pour une girafe, le nerf laryngé récurrent atteint 4,6 mètres de longueur. Alors pour un sauropode comme le brachiosaure, au cou d'environ 8 mètres (2 à 3 fois plus long que celui d'une girafe), le très long temps de transmission neuronale aurait empêché tout contrôle correct du mouvement rapide des cordes vocales lors de vocalisations complexes. En 2011, le nerf laryngé récurrent des sauropodes fut qualifié de «monument d'inefficacité». La prochaine fois que vous regarderez *Jurassic Park*, n'hésitez pas à corriger la bande-son...

Selon toute vraisemblance, de nombreux dinosaures étaient d'impressionnants chanteurs. Un groupe en particulier a développé des vocalisations parmi les plus sophistiquées du règne animal, et, du reste, les membres de ce groupe vivent encore parmi nous: il s'agit des oiseaux. Les premiers représentants ont été identifiés dans des gisements fossiles vieux d'environ 150 millions d'années, mais leurs capacités vocales uniques ont vraisemblablement évolué un peu plus tard.

Elles sont le fait d'une structure vocale spéciale, la syrinx (voir l'encadré page 62), qui assure la quasi-totalité des vocalises aviaires, le larynx des oiseaux étant réduit. Ce dernier est situé en haut de la voie aérienne principale, tandis que la syrinx se trouve en bas, où la trachée se ramifie vers les poumons en deux bronches. Cette disposition anatomique présente plusieurs avantages. L'un des plus fondamentaux, décrit en 2019 par Tobias Riede, de l'université du Midwest, en Arizona, et ses collègues, est qu'il améliore considérablement l'efficacité de la résonance. En d'autres termes, la syrinx produit plus de son pour le même coût énergétique.

Autre avantage, cet organe est en mesure d'utiliser différemment les flux d'air provenant



Les mammifères, reptiles et amphibiens actuels ont tous un larynx, une «boîte vocale» qui produit une grande variété de sons grâce aux cordes vocales. Cet organe est principalement contrôlé par le nerf laryngé récurrent. Le larynx étant composé de cartilage, il est rarement conservé dans les fossiles, mais sa présence chez tous les vertébrés terrestres vivants suggère qu'ils en ont hérité de leur dernier ancêtre commun, il y a quelque 300 millions d'années.

## LA SYMPHONIE DU VIVANT

La punaise aquatique *Micronecta scholtzi*, de 2 millimètres de longueur, émet avec son pénis râpeux des sons jusqu'à 105 décibels, l'équivalent d'un klaxon de voiture.



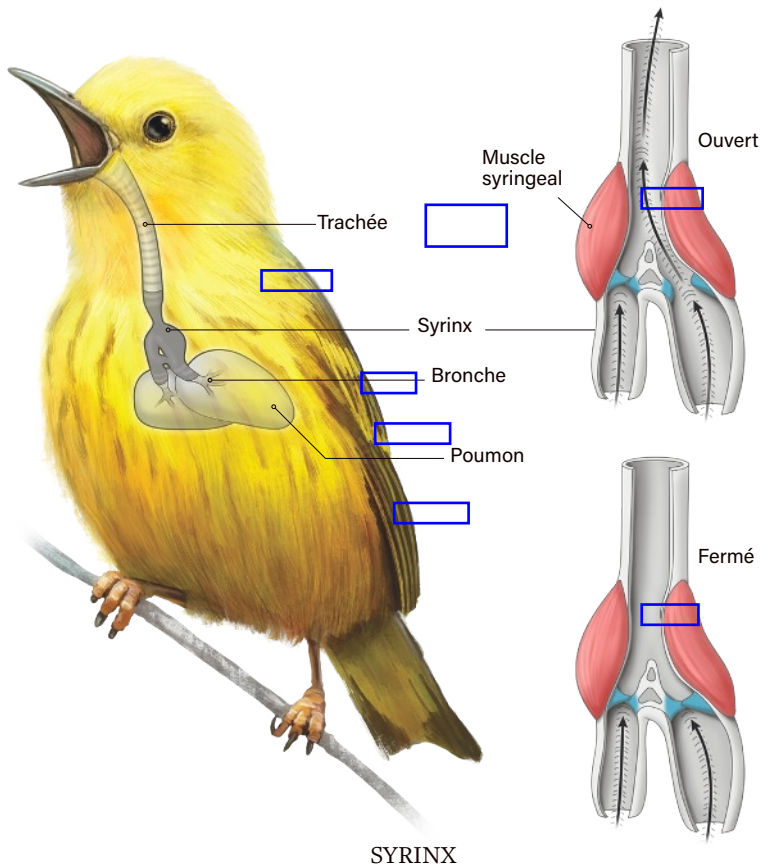
**L**es premiers sons des animaux étaient essentiellement involontaires : dans l'océan des origines, au Précambrien, ils émanaient par exemple d'écroulements de grands récifs stromatolithiques (des structures calcaires érigées en partie par des cyanobactéries) puis coralliens, en des fracas dignes des meilleures musiques industrielles. Quant aux gaboniontes, possiblement l'une des plus anciennes formes de vie pluricellulaire, peut-être émettaient-ils déjà il y a 2,1 milliards d'années des bruits de succion ou de brouillage lorsqu'ils évoluaient dans les sédiments. Mais la musique du vivant s'est notablement diversifiée dès que les espèces ont interagi, dans un prélude aux orchestres. Il y a 575 millions d'années, durant la radiation d'Avalon (ce site fossilifère du Canada est aussi un fameux titre de Roxy Music !), les premiers prédateurs, toujours marins, jouent des pinces tandis que leurs proies ferment leurs plaques et leurs coquilles. La course aux armements se transforme en course aux instruments : les espèces se cherchent, se rencontrent ou s'évitent. Les premiers claquements de mâchoires aux bruits de sécateurs sont ceux des placodermes, « poissons » à plaques prédateurs d'autres poissons eux aussi cuirassés, apparus vers 450 millions d'années. À la même époque les pattes

articulées des arthropodes grattent et frappent déjà le sol. L'orchestre s'enrichit et se complexifie avec la diversification des tétrapodes sur les terres émergées autour de 350 millions d'années et de leurs premières interactions avec les insectes qui déjà vrombissaient dans les airs. À cette époque, le vol des libellules géantes *Meganeura monyi* (de 70 centimètres d'envergure !) n'avait sans doute rien à envier en termes de décibels au bruit assourdissant des ornithoptères de la saga de science-fiction *Dune*. Un son strident peut repousser un prédateur tout en augmentant vos chances de trouver l'âme sœur ! Ainsi, les insectes, grands virtuoses, inventent un nouvel orchestre avec violon, archet et autres organes chitineux : pour la stridulation, les ailes et les pattes sont mises à contribution, et parfois même les organes génitaux, comme observé récemment chez la punaise aquatique *Micronecta scholtzi*, que l'on peut entendre en Europe, ou encore la tipule (cousine géante du moustique) : l'édéage, c'est-à-dire l'appendice reproducteur, vibre pendant l'accouplement et crée un double effet, vibromassant et sonore à la fois. Les ailes constituent assurément des instruments très raffinés, comme les élytres des grillons très spécialisés. Chez ces orthoptères et leurs proches cousins aux ailes modifiées, l'émission

et la réception des sons sont à l'origine de leur diversification depuis 300 millions d'années, date à laquelle les premières ailes de grillons sont attestées. Un groupe éteint, les *Permostridulidae* (les « stridulateurs du Permien »), arborait, quant à lui, des ailes avec un dispositif de stridulation simple, mais tout aussi efficace. Chez ces espèces, chanter augmente les chances de se reproduire, mais plus encore, chanter en chœur aide à passer inaperçu en brouillant les pistes chez les prédateurs. Les vertébrés ne sont pas en reste : il y a environ 150 millions d'années, déjà des grenouilles coassaient et des dinosaures aviens roucoulaient. Émettre des sons, c'est complexifier son rapport aux autres (prédateurs, proies ou congénères) et développer des organes à la fois émetteurs (ailes, larynx) et récepteurs (canaux sensoriels, aires cérébrales, tympans...). La musique a été un moteur de l'évolution. Est-ce encore le cas, alors qu'une espèce, la nôtre, fait plus de bruit que toutes les autres et participe par ailleurs à la dérégulation des écosystèmes, se traduisant, selon Rachel Carlson, par un « Printemps silencieux ».

Jean-Sébastien Steyer  
et Romain Garrouste,  
Muséum national d'histoire  
naturelle, Paris.





SYRINX

Outre un larynx (atrophié), les oiseaux sont dotés d'une syrinx, une structure vocale qu'ils utilisent pour produire chants et cris parfois complexes. Elle est située en bas de la trachée, à l'endroit où celle-ci se ramifie en bronches vers les poumons. Grâce à cette disposition, les volatiles d'une part produisent plus de sons qu'avec un larynx pour un même coût énergétique, et d'autre part distinguent les flux d'air provenant des poumons gauche et droit pour produire des sons différents. Les oiseaux fossiles les plus anciens ont 150 millions d'années, mais la syrinx est probablement plus récente.

des poumons droit et gauche. Les oiseaux chanteurs sont particulièrement doués pour jouer de cette caractéristique et produire des sons, simultanément ou indépendamment, distincts selon la bronche. Parfois, les côtés sont spécialisés dans des plages de fréquences données: l'animal fait alors des duos tout seul! Le magnifique chant de la grive solitaire *Catharus guttatus* en est un bel exemple.

Les origines de la syrinx sont encore mal connues, et la plus ancienne jamais mise au jour provient de *Vegavis iaai*, un oiseau ayant vécu à la fin du Crétacé, il y a 69 à 66 millions d'années, et décrit en 2016 par Julia Clarke. Mais cette syrinx était déjà assez spécialisée, avec un espace de résonance élargi et une asymétrie associée à la production de sons à deux entrées. Une version plus primitive de l'organe est sans doute apparue plus tôt.

Les autres vertébrés volants du Mésozoïque, les ptérosaures, n'avaient pas de syrinx, et ne produisaient donc pas les mêmes sons que les oiseaux, contrairement à ce que Hollywood tente parfois de nous faire croire. Leurs cris

ressemblaient plus probablement à ceux d'autres reptiles (grognement, sifflement, cliquètement...). Peut-être claquaient-ils aussi du bec, ce qui de la part d'un ptérosaure géant, avec un crâne de près de 3 mètres de longueur, a pu être assourdissant pour qui se trouvait à proximité.

## VOIR AVEC LE SON

Après la disparition des dinosaures et l'entrée dans le Cénozoïque, il y a 66 millions d'années, une toute nouvelle façon de percevoir le monde, basée sur les sons, est très tôt apparue: l'écholocation. Apanage des chauves-souris et des cétacés, ce sens nécessite une anatomie assez complexe. L'animal doit produire un faisceau de sons, le diriger dans la direction souhaitée, percevoir les échos et les analyser pour déterminer la distance, la vitesse et la forme générale de l'objet sur lequel les sons ont rebondi. Néanmoins, l'écholocation est idéale pour naviguer et chasser dans le ciel nocturne ou dans des eaux troubles.

Comme pour la lumière, la taille du plus petit objet visible par écholocation est égale à la moitié de la longueur d'onde du faisceau émis. Cependant, les ondes sonores sont beaucoup plus longues que les ondes lumineuses, de sorte que pour obtenir une «image» exploitable de l'environnement ou pour détecter de minuscules insectes, l'émetteur doit produire des sons à très haute fréquence (et donc à courte longueur d'onde). Chez les chauves-souris, ces cris, produits par le larynx et la langue, nous sont généralement inaudibles. L'ouïe humaine plafonne à environ 20000 hertz, alors que les ultrasons des chauves-souris s'étendent jusqu'à 200000 hertz. Nous n'entendons jamais que les cris à basse fréquence des chauves-souris, ces grincements aigus à notre oreille équivalents pour elles à des voix de baryton-basse.

Grâce aux fossiles, nous savons à peu près quand les chauves-souris ont commencé à écholocaliser. Pour percevoir les échos, ces animaux ont besoin de cochlées (la structure primaire de l'audition, constituant l'oreille interne, dans le crâne) relativement grandes. Vos deux cochlées tiendraient largement sur une pièce de deux centimes, alors que celles d'une chauve-souris, rapportées à notre échelle, auraient chacune la taille d'une balle de golf. *Icaronycteris index*, l'une des plus anciennes chauves-souris connues, présentait déjà il y a plus de 50 millions d'années les caractéristiques du crâne associées à l'écholocation ultrasonique des chauves-souris actuelles.

Cette évolution chez les chauves-souris a marqué une révolution écologique majeure: les vertébrés pouvaient désormais chasser les insectes volants dans l'obscurité totale, mettant fin à 275 millions d'années de relative tranquillité

pour ces arthropodes. Les chauves-souris ont prospéré grâce à cette innovation, au point qu'elles représentent aujourd'hui à elles seules environ 20% des espèces de mammifères.

Si l'écholocation fonctionne bien dans les environnements aériens, elle est encore mieux adaptée aux milieux aquatiques, car l'eau transporte l'énergie sonore avec beaucoup moins de perte de signal par unité de distance, ce qui donne aux écholocalisateurs immergés une plus grande portée que leurs homologues aériens. Les sons à haute fréquence ont toujours une portée réduite par rapport à ceux à basse fréquence dans le même environnement, mais dans l'eau, certains dauphins, avec des ondes sonores de seulement 100 à 150 hertz, parviennent à distinguer des objets par écholocation jusqu'à une distance de 200 mètres, contre «seulement» 50 à 100 mètres pour les chauves-souris avec de gros objets (c'est plus court avec de petits insectes).

Les dauphins marins, notamment le grand dauphin *Tursiops truncatus*, utilisent l'écholocation pour un «premier regard» à longue distance dans les eaux sombres ou turbides. Les dauphins de rivière, comme ceux du fleuve Amazone, comptent beaucoup plus sur l'écholocation dans leur environnement exceptionnellement trouble. De fait, les dauphins d'eau douce ont des yeux plus petits et donc une acuité visuelle réduite par rapport aux autres cétacés.

Les mammifères marins détiennent quelques records en matière de sons. Si le but est de produire un son qui se propage aussi loin que possible, plutôt que d'essayer d'entendre les échos, la meilleure option est d'utiliser des sons de très basse fréquence. Par leur taille, et les capacités de résonance qu'elle offre, les grands animaux aquatiques ont ici un avantage naturel. Il n'est donc pas surprenant que les champions de la portée sonore soient les baleines géantes. Avec des larynx jusqu'à 60 centimètres de long et des cris si bas qu'un humain est incapable de les entendre, le chant de certaines de ces baleines porte sur des centaines, voire des milliers de kilomètres. Entre les chauves-souris et les baleines, le monde est encore plus bruyant que nous ne le pensons.

## LA RÉVOLUTION DU LANGAGE

Quelque 230 millions d'années après que les sons des premiers mammifères ont commencé à résonner, la vocalisation a pris un tour nouveau avec l'apparition du langage humain. Les conditions anatomiques préalables, notamment un larynx capable de s'adapter rapidement et une coordination du larynx et de la langue, semblent remonter au moins à l'origine du genre *Homo*. Nos ancêtres ont donc pu avoir une certaine forme de communication vocale il y a déjà 2,8 millions d'années. Cependant, la



# Le chant de certaines baleines porte sur des centaines, voire des milliers de kilomètres



date de l'apparition du langage et la première espèce à en avoir bénéficié restent débattues, car cette faculté ne dépend pas seulement de l'anatomie, mais aussi des capacités cognitives de pensée symbolique. À en croire les restes d'activité lithique notamment, *Homo erectus* en aurait été le premier doté, il y a environ 1,8 million d'années. Mais le langage humain pleinement formé, avec ses règles complexes de grammaire et de syntaxe, serait propre à notre espèce, et ne serait alors apparu qu'au cours des dernières centaines de milliers d'années.

Son développement s'est accompagné de celui de capacités uniques et particulièrement utiles, comme enseigner et apprendre ce même langage. Des singes ont certes réussi à pratiquer les rudiments de la langue des signes, mais aucun d'eux n'a jamais enseigné cette langue à d'autres membres de son espèce, même lorsqu'il en avait l'occasion. Ainsi, lorsqu'un chimpanzé de l'université Duke à qui on avait appris à signer a réintégré son groupe, il a essayé d'utiliser ses nouvelles compétences pour communiquer avec ses congénères. Au bout d'une semaine, ses gardiens l'ont retrouvé isolé dans un coin de l'enclos. À la question, posée en langue des signes: «Pourquoi n'es-tu pas avec les autres?», il aurait répondu: «Parce que ce sont des insectes.»

Le langage humain est l'une des «inventions» du vivant les plus marquantes sur laquelle repose la formation de nos groupes sociaux, de nos sociétés et de nos civilisations. Nos sons ne sont ni les premiers du monde animal, ni les plus puissants, ni les plus mélodieux, mais ils sont indubitablement ceux qui ont le plus changé le monde. En facilitant la coordination de nos efforts, notre langage est à la base de toutes nos innovations, de l'agriculture au néolithique jusqu'aux stations spatiales d'aujourd'hui, en passant par les moyens de transport, les machines de nos usines et tout ce qui contribue aux paysages sonores – plus ou moins tolérables – de notre époque. ■

## BIBLIOGRAPHIE

La sonothèque du Muséum national d'histoire naturelle : [sonothèque.mnhn.fr](http://sonothèque.mnhn.fr)

T. Riede et al., **The evolution of the syrinx : An acoustic theory**, *Plos Biology*, 2019.

J. Clarke et al., **Fossil evidence of the avian vocal organ from the Mesozoic**, *Nature*, 2016.

J.-J. Gu et al., **Wing stridulation in a Jurassic katydid (Insecta, Orthoptera) produced low-pitched musical calls to attract females**, *PNAS*, 2012.

J. Sueur et al., **So small, so loud: extremely high sound pressure level from a pygmy aquatic insect (Corixidae, Micronectinae)**, *Plos One*, 2011.

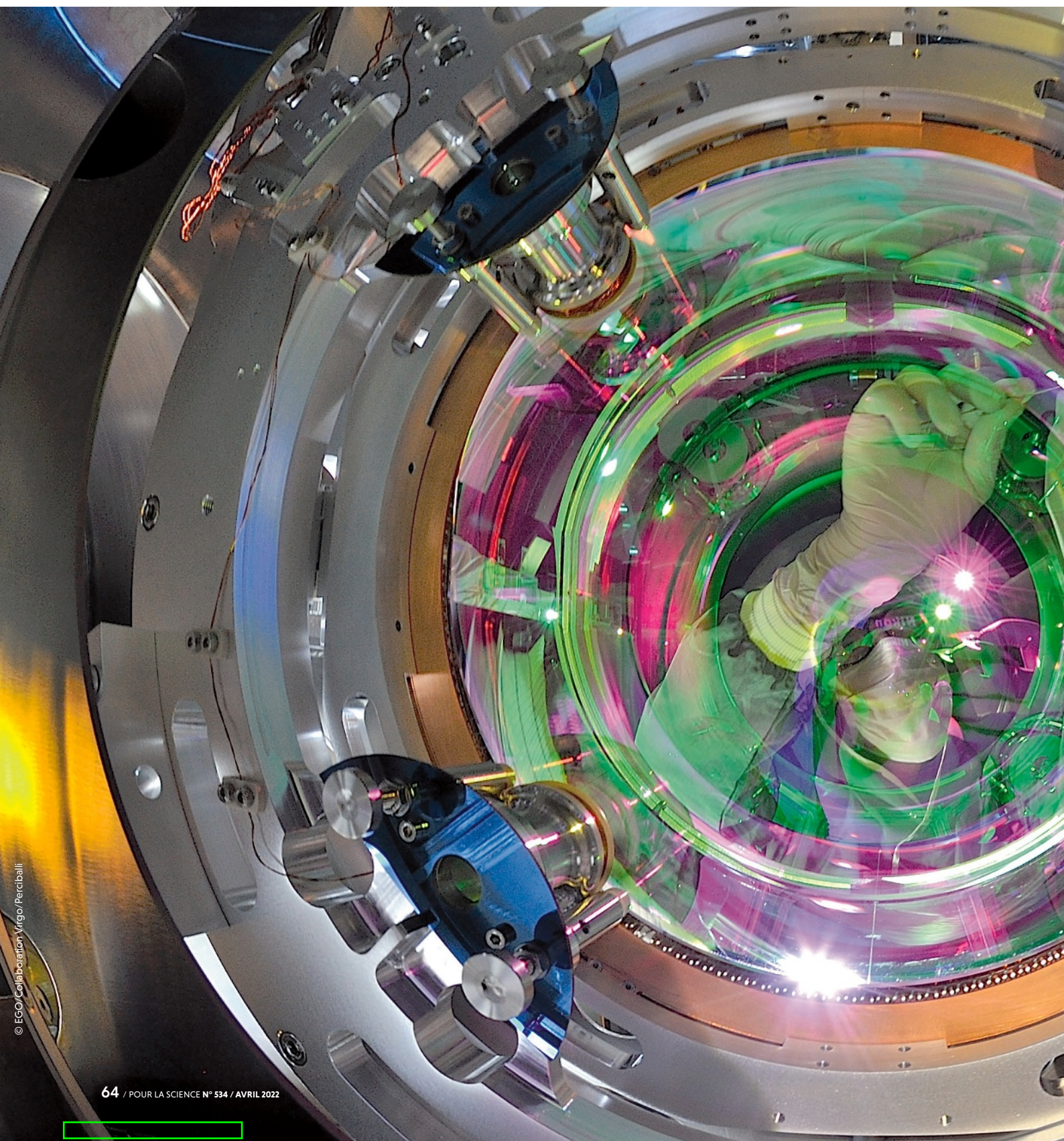
J.-S. Steyer, **La Terre avant les dinosaures**, Belin, 2009.

M. Engel et D. Grimaldi, **New light shed on the oldest insect**, *Nature*, 2004.

D. Weishampel, **Acoustic analyses of potential vocalization in lambeosaurine dinosaurs (Reptilia : Ornithischia)**, *Paleobiology*, 1981.

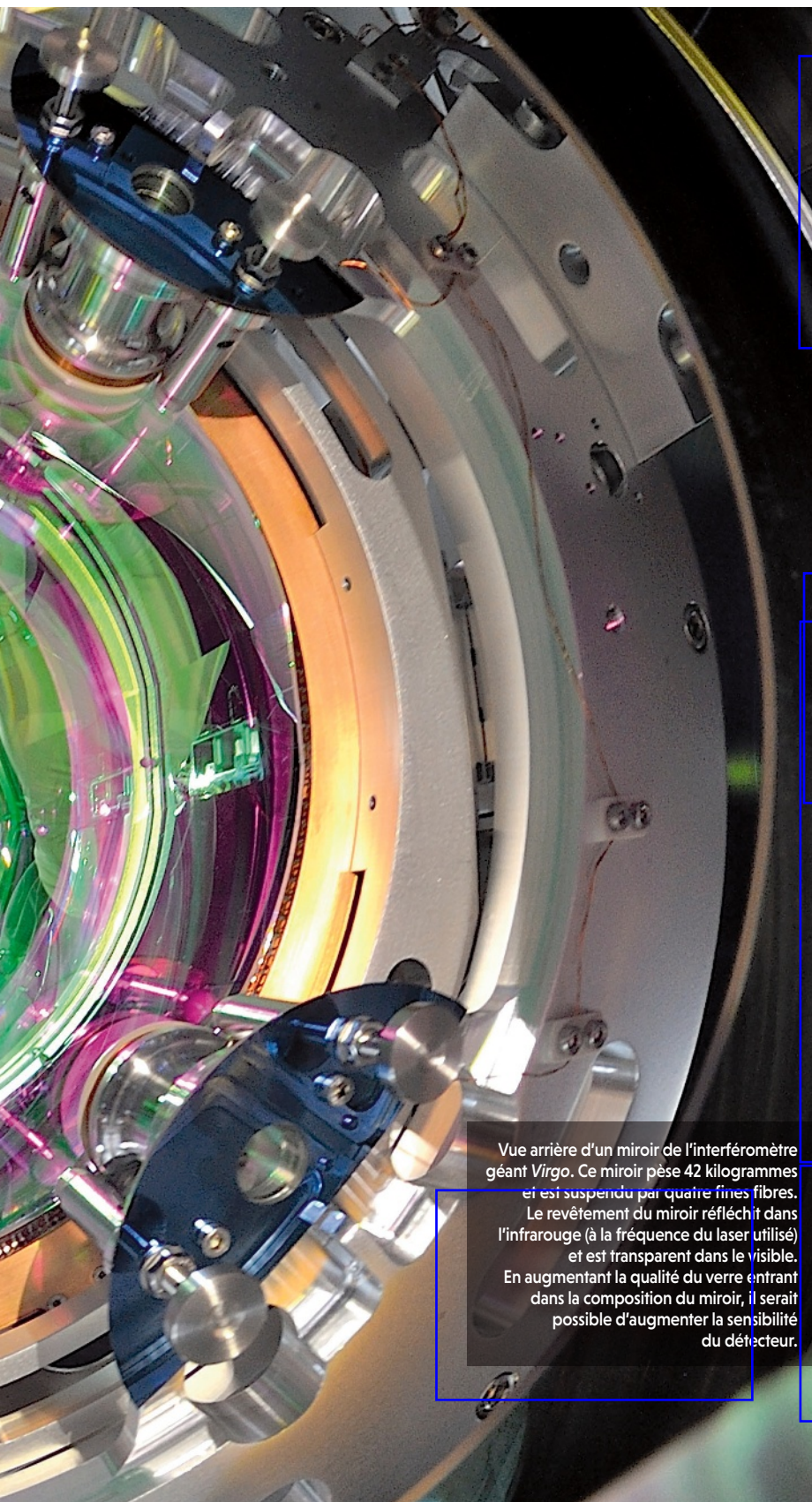


# À la recherche





# du verre idéal



Vue arrière d'un miroir de l'interféromètre géant *Virgo*. Ce miroir pèse 42 kilogrammes et est suspendu par quatre fines fibres. Le revêtement du miroir réfléchit dans l'infrarouge (à la fréquence du laser utilisé) et est transparent dans le visible. En augmentant la qualité du verre entrant dans la composition du miroir, il serait possible d'augmenter la sensibilité du détecteur.

Les secrets de la fabrication du verre sont connus depuis des millénaires. Est-il encore possible d'en améliorer les propriétés? La prédiction théorique de l'existence d'un « verre idéal » le suggère. De nouvelles méthodes d'élaboration et de simulation se rapprochent de cet étonnant état de la matière.

Ludovic Berthier et Camille Scalliet

Aux États-Unis, en Italie et au Japon, les physiciens écoutent les vibrations du cosmos sous la forme d'ondes gravitationnelles. Grâce à des interféromètres géants, nommés *Ligo*, *Virgo* et *Kagra*, ils traquent les infimes vibrations de l'espace-temps. Ces dispositifs, constitués de cavités de plusieurs kilomètres de longueur dans lesquelles circulent des faisceaux laser, doivent déceler des variations de longueur inférieure au diamètre du noyau d'un atome. Pour atteindre une telle sensibilité, toutes les sources de perturbations doivent être éliminées. L'une des plus importantes d'entre elles est liée à la qualité du verre qui recouvre les miroirs réfléchissant la lumière laser aux extrémités des cavités. En utilisant du verre de la meilleure qualité possible, les chercheurs veulent limiter la dissipation d'énergie dans ces miroirs et améliorer encore la précision des mesures.

À l'instar de la traque des ondes gravitationnelles, de nombreux autres domaines exigent d'intégrer aux technologies de pointe qui leur sont consacrées un verre d'une qualité toujours supérieure. Par exemple, le fonctionnement de certains ordinateurs quantiques nécessite d'atteindre des niveaux de cohérence quantique sans précédent. La moindre perturbation réduit à néant cette cohérence. Or les composants vitreux des circuits quantiques



## L'ESSENTIEL

→ La structure du verre correspond à celle, désordonnée, d'un liquide. Il y a soixante-dix ans, il a été suggéré qu'un état parfaitement désordonné de la matière était possible : le verre « idéal ».

> D'un point de vue théorique, des résultats récents indiquent que cette phase particulière pourrait bien exister.

> Expérimentalement, les spécialistes ont mis au point une méthode

de fabrication du verre qui contourne le problème du refroidissement extrêmement lent nécessaire pour fabriquer le verre idéal. Par dépôt de molécules en phase gazeuse, ils produisent des verres ultrastables.

> Les simulations numériques ont été optimisées ces dernières années. Elles confirment les données expérimentales et permettent une analyse des propriétés des verres à l'échelle de la molécule.

## LES AUTEURS



**LUDOVIC BERTHIER**  
directeur de  
recherche du CNRS  
à l'université  
de Montpellier



**CAMILLE SCALLIET**  
postdoctorante  
à l'université  
de Cambridge

sont encore une fois une source de dissipation non désirée. Produire des matériaux vitreux limitant ces désagréments serait un pas décisif dans la mise au point de ces technologies révolutionnaires.

Les plus anciennes traces de verre manufacturé ont été mises au jour en Mésopotamie et remontent au cinquième millénaire avant notre ère. Ce matériau se retrouve partout aujourd'hui, aussi bien dans les objets du quotidien que dans la réalisation d'œuvres d'art, comme les célèbres verres de Murano.

Il est présent en architecture, dans l'industrie pharmaceutique ou encore dans les fibres optiques du réseau internet. Les propriétés physiques du verre, comme sa transparence, son homogénéité, sa rigidité, sa résistance et sa durabilité en font un matériau de choix adapté à de nombreuses applications. Si les techniques de fabrication n'ont cessé de progresser au fil des siècles, peut-on encore améliorer la qualité du verre pour atteindre les exigences des technologies de demain ?

Existerait-il un verre « idéal », qui exploiterait les qualités tant recherchées du verre, et s'affranchirait des défauts qui limitent encore ses applications futures ? Aussi étonnant que cela puisse paraître, c'est probablement le cas.

## UN ÉTAT DE LA MATIÈRE

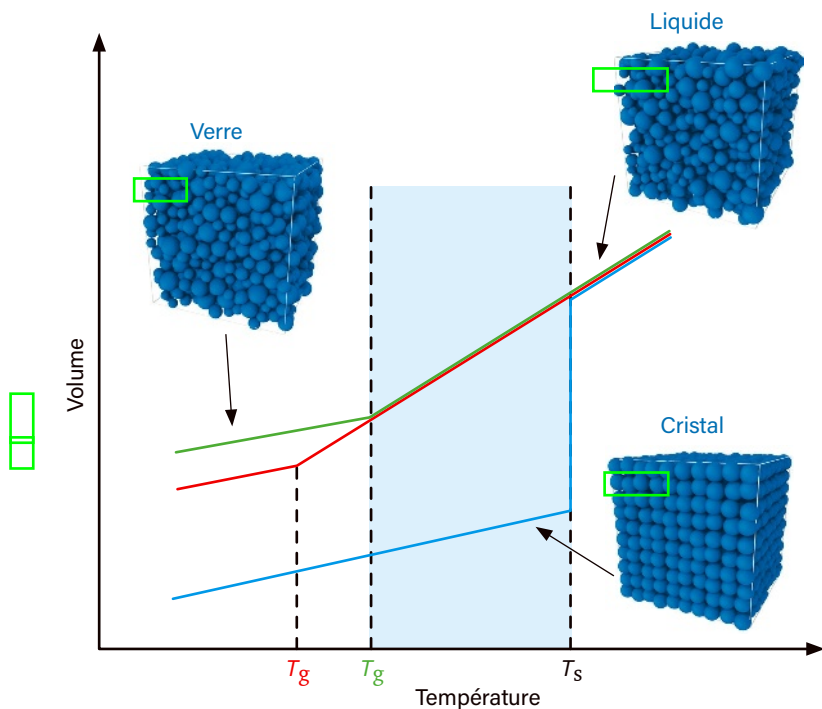
Le « verre idéal » serait un état de la matière répertorié par les physiciens, un état conjecturé dès 1948 par le chimiste américain Walter Kauzmann. Ses propriétés physiques restent à préciser mais répondraient à la demande des interféromètres géants et des ordinateurs quantiques. Cependant, un épineux obstacle se dresse sur cette piste. À l'heure actuelle, plus de soixante-dix ans après la formulation de cette idée, nous ne savons toujours pas si le verre idéal existe : une telle phase de la matière n'a été ni observée directement, ni établie par des calculs rigoureux pour des verres modèles dans un espace physique à trois dimensions. Et

si le verre idéal existe bel et bien, peut-on le fabriquer, à quoi ressemble-t-il ? Ce problème fondamental encore ouvert pour la physique classique moderne mobilise aussi bien des théoriciens, des expérimentateurs que des spécialistes de la simulation numérique. Au cours des dix dernières années, grâce à cet effort commun, les chercheurs ont réalisé des progrès considérables dans la compréhension microscopique des propriétés du verre en général, et dans leur quête du verre idéal en particulier. Aujourd'hui, sa réalisation semble quasiment à notre portée.

Mais qu'est-ce qu'un verre, et comment peut-il être idéal ? Rappelons d'abord qu'un verre est un matériau solide dont les composants élémentaires (atomes ou molécules) occupent des positions désordonnées dans l'espace. On parle de matériau « amorphe », en ce sens qu'il se distingue radicalement des solides cristallins dans lesquels les molécules sont situées sur les nœuds d'un réseau régulier formant une structure périodique totalement ordonnée.

Seconde distinction notable, le verre est en général obtenu lors d'une « transition vitreuse », dont la nature est mal comprise. Le plus souvent, lors du refroidissement d'un liquide,

# Le verre idéal serait l'état le plus parfaitement désordonné



quand la température passe sous la température de solidification, les molécules qui le constituent et qui se déplaçaient librement se positionnent soudainement selon un empilement ordonné, un cristal, et cessent de se mouvoir librement. Cependant, dans certaines conditions, et pour un grand nombre de composés, les molécules ne forment pas ce cristal et restent tout simplement dans leur état liquide totalement désordonné. Mais lors du refroidissement, la viscosité du liquide devient tellement grande que les molécules sont quasi immobiles et le matériau finit par nous apparaître solide : c'est la transition vitreuse.

Le souffleur de verre réalise cette transition vitreuse en sortant la silice fondue d'un four à plus de 1500 °C et l'exposant à l'air ambiant. En refroidissant, la silice passe graduellement d'un état liquide malléable à loisir vers un solide qui conserve alors la forme façonnée par l'artiste. La température de transition vitreuse n'est donc pas une température fondamentale de changement de phase comme la température de solidification du cristal (par exemple, 0 °C pour l'eau à pression atmosphérique). Elle n'est définie qu'approximativement en comparant la vitesse de refroidissement du liquide à la mobilité des molécules, qui ralentit considérablement à basse température (voir le schéma ci-dessus).

Un verre possède donc la structure microscopique désordonnée d'un liquide, mais la rigidité mécanique d'un solide cristallin. Alors que nous comprenons très bien les propriétés physiques des cristaux, nous appréhendons encore mal comment les propriétés macroscopiques des verres émergent de leur

Lorsqu'un liquide est refroidi, il peut cristalliser à la température de solidification  $T_s$ . Ses particules s'organisent alors suivant un réseau régulier et périodique. Les caractéristiques du matériau changent alors subitement, on parle de transition de phase du premier ordre (courbe bleue). Dans certains cas, le liquide ne cristallise pas. La viscosité augmente rapidement lorsque la température diminue, au point de figer les particules dans leur position désordonnée. On obtient un verre. Cette « transition vitreuse » intervient à une température qui dépend de la vitesse de refroidissement ( $T_g$  vert ou rouge). Entre  $T_s$  et  $T_g$ , le liquide est dit « en surfusion ». Cet état est métastable, une petite perturbation peut déclencher une cristallisation rapide.

structure microscopique désordonnée. Spécialiste du désordre, le Prix Nobel de physique 1977 Philip Anderson a écrit en 1995 que « l'un des problèmes les plus profonds et intéressants dans le domaine de la matière condensée est probablement celui de la nature du verre et de sa transition vitreuse ». L'état désordonné du verre est clairement l'obstacle majeur pour mieux comprendre les propriétés de cette phase amorphe.

Par exemple, le réseau d'un solide cristallin contient souvent des imperfections, nommées « lacunes » ou « dislocations ». Si le cristal est soumis à une contrainte mécanique, le matériau se déformera (ou cassera) préférentiellement au niveau de ces défauts. Comment identifier un défaut dans un verre dont la structure nous semble totalement désordonnée ? Nous savons encore très mal définir et identifier des défauts dans un verre et prédire notamment comme celui-ci va se déformer.

Alors qu'il est simple de déduire le comportement d'un solide cristallin à partir de sa structure ordonnée périodique (par exemple sa chaleur spécifique, voir l'encadré page 70), faire un calcul direct pour un verre requiert *a priori* de connaître la position de chacun des atomes, ce qui est évidemment impossible. De plus, le nombre de configurations désordonnées accessibles pour les atomes est extrêmement grand, alors que le cristal parfait est unique. Dans ces conditions, il est loin d'être évident de définir le « meilleur » verre parmi une infinité de possibilités. Mais des progrès ont été réalisés dans ce domaine : le prix Nobel de physique 2021, décerné au physicien italien Giorgio Parisi, récompense des travaux théoriques développant des outils mathématiques originaux permettant précisément de calculer les propriétés physiques de matériaux désordonnés caractérisés par l'existence d'un grand nombre de configurations accessibles, qualifiés de « systèmes complexes ».

## LE PLUS PARFAIT DÉSORDRE

Quand il a formulé l'hypothèse du verre idéal en 1948, Kauzmann ne disposait pas de ces outils prometteurs. Il n'en a pas moins trouvé le moyen de mieux comprendre le désordre déroutant des verres. Il s'est intéressé à l'évolution de l'entropie configurationnelle pour divers liquides formant des verres. L'entropie configurationnelle quantifie de façon précise la complexité des verres et correspond mathématiquement au logarithme du nombre d'arrangements possibles des atomes dans le liquide. Cette entropie est donc une mesure du désordre. Le liquide à haute température est peu contraint et beaucoup de configurations sont accessibles : l'entropie est grande. Lorsque la température baisse, le nombre d'états de basse énergie et totalement



désordonnés devient plus restreint : l'entropie diminue. En rassemblant les données expérimentales disponibles à l'époque, Kauzmann remarque que s'il extrapole l'entropie configurationnelle de ces liquides, elle semble tomber à zéro à très basse température... où aucune donnée n'est disponible. Cette observation suggère l'existence d'une température critique, la température de Kauzmann, à laquelle l'entropie configurationnelle s'annulerait. Si cette hypothèse est vraie, il n'y aurait alors à cette température qu'une seule configuration désordonnée possible : le verre idéal, qui serait l'état le plus « parfaitement désordonné ».

D'un point de vue théorique, la notion de verre idéal ne s'est imposée que progressivement, car le problème est conceptuellement difficile à formaliser. En 1958, les Américains Julian Gibbs et Edmund DiMarzio ont proposé une analyse théorique très simplifiée, mais qui prédit en effet l'existence d'un verre idéal. Au milieu des années 1980, les Américains Ted Kirkpatrick, Dave Thirumalai et Peter Wolynes ont réalisé une avancée déterminante. Ils ont établi un lien entre la physique des verres qui nous occupe ici et celle des « verres de spins », dont l'étude théorique était alors plus avancée. Les verres de spin sont des alliages emplis d'impuretés dotées d'un spin magnétique qui ont été étudiés expérimentalement depuis les années 1970. Leur analyse théorique est justement l'une des contributions majeures de Giorgio Parisi au début des années 1980. Dans une géniale intuition, Peter Wolynes et ses collègues ont compris que certains modèles de verres de spin possèdent une transition de phase vers un état de la matière vitreux qui serait l'analogue, pour des spins, du verre moléculaire idéal prédit par Kauzmann. Si la physique est friande de ces concepts d'unification et d'universalité, il reste pourtant à en démontrer la validité.

Il faudra encore des années d'efforts acharnés pour entrevoir les premières lueurs grâce à une combinaison de nouvelles techniques mathématiques. En particulier, une importante série de travaux menés au cours des dix dernières années, à laquelle nous avons apporté notre modeste contribution, a permis le développement d'un imposant édifice théorique offrant une description de la physique des verres moléculaires évoluant dans un espace comportant  $d$  dimensions. Dans la limite hypothétique (et certainement non physique) où le nombre de dimensions  $d$  devient grand, il est possible de calculer exactement certaines grandeurs. On peut comprendre intuitivement pourquoi. Dans un espace à une seule dimension,  $d = 1$ , un atome possède deux voisins ; dans un monde à deux dimensions, le nombre de voisins passe à six, puis à douze pour  $d = 3$ , etc. Lorsque  $d$  devient très grand, chaque atome possède un très grand

nombre de voisins et devient soumis à une force moyenne, nommée « champ moyen ». Il est alors possible d'utiliser des outils statistiques puissants pour décrire les interactions des atomes de manière exacte. L'approche du champ moyen est exploitée dans de très nombreux domaines de la physique théorique.

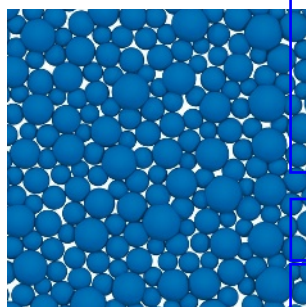
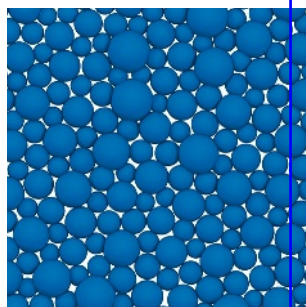
Avec le champ moyen, il devient possible de calculer de nombreuses propriétés du verre.

Cette approche confirme en particulier qu'une transition de phase vers un verre idéal est réalisable. Elle permet même de préciser la nature de la transition de phase et de faire le lien avec les mesures expérimentales. Nous connaissons désormais précisément, dans cette limite de grande dimension, comment les phases liquide et vitreuse s'organisent. Ces travaux suggèrent ainsi que le verre idéal correspond bien à un arrangement totalement aperiodique des particules sans aucun ordre apparent. Ce désordre est en revanche « parfait », en ce sens que l'on peut lui attacher une « longueur de cohérence » qui serait finie dans le liquide mais deviendrait infinie dans ce verre idéal. Cela signifie dans ce dernier cas que, de façon paradoxale, alors que cet état est désordonné, chaque particule y occupe une place bien définie et retirer ou déplacer un atome reviendrait alors à altérer cette structure parfaite.

## LE PROBLÈME DU REFROIDISSEMENT

Le problème du verre en grande dimension est donc résolu, même s'il reste encore à étudier les nombreuses conséquences physiques de cette approche. Le défi théorique est aujourd'hui de comprendre si ces prédictions restent pertinentes pour les verres de notre monde physique à trois dimensions. L'état actuel des connaissances ne permet pas encore de répondre à cette question de façon totalement contrôlée d'un point de vue mathématique et beaucoup de travail reste à faire. Dans ce contexte, d'autres approches, telles que des simulations numériques ou des expériences, sont indispensables.

Expérimentalement, comment peut-on fabriquer des verres qui tendraient vers ce verre idéal ? De façon schématisée, un verre expérimental possède la structure microscopique dans laquelle il se trouvait à la température de transition vitreuse, lorsque les atomes perdent leur capacité à se réorganiser. Un verre idéal serait donc obtenu en abaissant la température de transition vitreuse vers la température identifiée par Kauzmann. Or c'est la vitesse de refroidissement qui contrôle cette grandeur : plus le refroidissement est lent et plus la température de transition vitreuse est faible. Et, en effet, on constate bien qu'un refroidissement lent produit des verres un peu plus denses, stables et résistants.



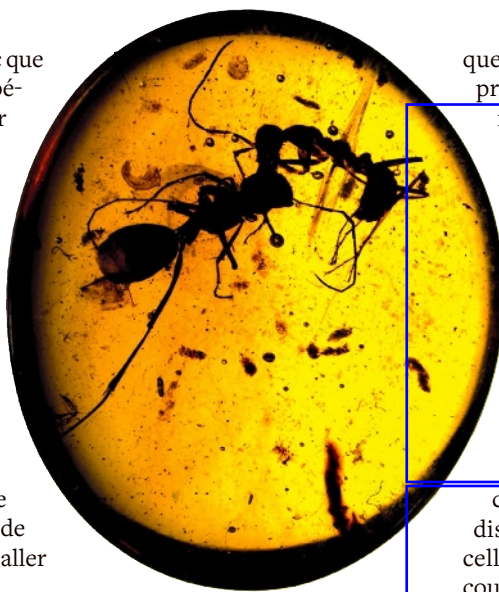
Ces deux verres ont été simulés avec des temps de refroidissement qui diffèrent par douze ordres de grandeur (long pour le premier, court pour le second). Il est très difficile d'identifier à l'œil des différences dans la concentration de défauts. Cela tient au fait que les particules dans ces matériaux ont, par nature, une configuration désordonnée. Néanmoins, des outils statistiques permettent de montrer que leur entropie configurationnelle est très différente.

Conceptuellement, il n'existe donc que deux solutions pour abaisser la température de transition vitreuse: refroidir

le plus lentement possible, ou bien trouver une solution ingénieuse pour contourner le problème apparemment insoluble de ce temps de refroidissement. Refroidir plus lentement n'est pas une solution pratique. En effet, la viscosité du liquide augmente tellement fortement en diminuant la température, qu'il faudrait ralentir d'autant la vitesse de refroidissement. Concrètement, préparer un verre en un jour plutôt qu'en une minute ne diminue que très peu la température de transition vitreuse et il est difficile d'aller beaucoup plus lentement.

Une autre piste consisterait à laisser «vieillir» pendant très longtemps un verre après sa formation, en espérant que sa lente réorganisation interne change ses propriétés physiques et le fasse tendre vers le verre idéal. Là encore, des temps d'attente incroyablement longs seraient nécessaires. La nature nous offre toutefois des exemples de verres très anciens qui ont donc vieilli pendant des millions d'années: l'ambre est un verre de polymères naturels ayant évolué sur une échelle de temps géologique qui peut être étudié en laboratoire. En 2014, Miguel Ramo, de l'université de Madrid, et ses collègues ont étudié des échantillons d'ambre vieux d'environ 110 millions d'années. La densité de l'ambre semble avoir beaucoup augmenté au cours du temps suggérant que sa structure a bien continué à évoluer pour s'approcher du verre idéal. En revanche, d'autres caractéristiques, comme sa chaleur spécifique à basse température (voir l'encadré page 70), ne sont pas différentes de celle d'un ambre jeune. Cette expérience amène à s'interroger sur les différences essentielles entre un verre très ancien et un verre ordinaire. D'autres travaux seront nécessaires pour mieux comprendre le vieillissement des verres.

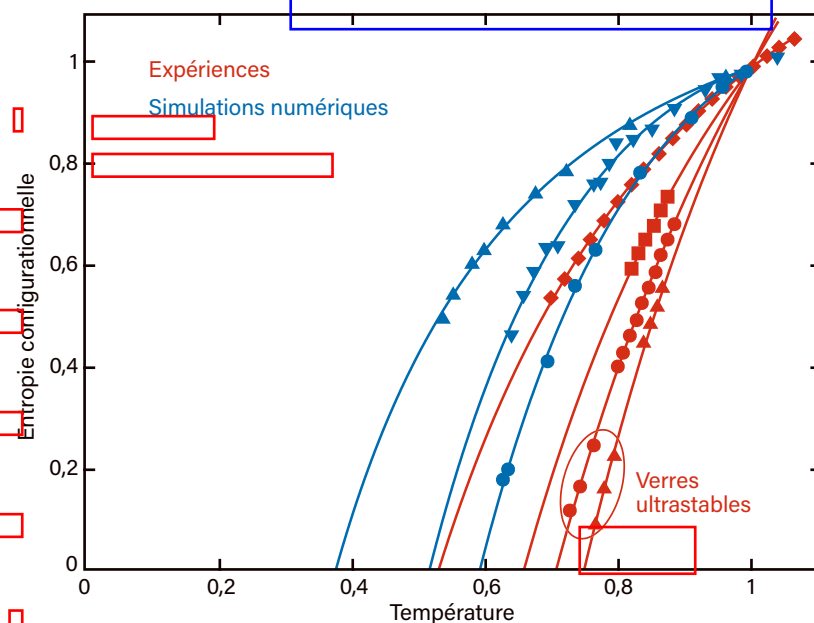
Une nouvelle piste paraît autrement prometteuse. Elle consiste à créer des verres par une technique complètement distincte d'un simple refroidissement. En 2007, le groupe du chimiste américain Mark Ediger, de l'université de Madison-Wisconsin, aux États-Unis, a réalisé des films minces vitreux en déposant lentement des molécules en phase gazeuse directement sur un substrat dont la température est contrôlée. Les chercheurs constatent que pour certaines valeurs de la température et pour des taux de déposition suffisamment lents, les films vitreux ont des propriétés totalement inattendues. Tout se passe comme si les films ainsi synthétisés en seulement



L'ambre est un verre obtenu à partir de résine d'arbre. Dans cet échantillon vieux de 99 millions d'années et retrouvé en Birmanie, Phillip Barden et David Grimaldi, du Museum américain d'histoire naturelle, à New York, ont identifié deux fourmis de deux espèces distinctes en plein combat. Pour les spécialistes du verre, l'ambre est une occasion unique d'étudier un verre ancien dont la structure s'est réorganisée sur des échelles de temps géologiques.

quelques heures au laboratoire avaient été préparés par un refroidissement extrêmement lent du liquide, correspondant à des temps de préparation effectifs de plusieurs milliers, voire plusieurs millions d'années. Le problème du temps de préparation semble ainsi totalement contourné, et l'analogie de l'ambre géologique devient réalisable en seulement quelques heures au laboratoire, sans devoir attendre 100 millions d'années. Pour cette raison, ces verres sont dits «ultrastables».

L'explication physique de ce véritable miracle vient du fait que les molécules qui arrivent à la surface du film disposent d'une plus grande mobilité que celles qui sont déjà recouvertes par plusieurs couches (voir la figure page 71). Cette mobilité de surface permet donc au verre de trouver rapidement une configuration optimale en exploitant une géométrie inaccessible au verre en volume. Depuis 2007, Mark Ediger et ses collègues ont démontré qu'en maintenant le substrat à environ 85% de la température de transition vitreuse du liquide, les films ainsi créés sont plus denses, plus stables, plus résistants et ont une entropie configurationnelle sensiblement plus faible que le même verre formé par refroidissement du liquide (voir la figure ci-dessous). Des mesures plus récentes suggèrent que ces films ultrastables auraient une température de transition vitreuse qui s'approche de seulement quelques degrés de



En étudiant l'entropie configurationnelle (une façon d'estimer le nombre de configurations possibles des particules au sein du matériau) de différents liquides formant des verres, lorsque la température diminue, Walter Kauzmann a suggéré que cette entropie devenait nulle au lieu d'atteindre un plateau à partir d'une certaine température, le verre prenant ainsi une configuration idéale. L'étude récente des verres ultrastables et les nouvelles techniques de simulation numérique renforcent cette idée, même si le verre idéal n'a pas encore été atteint.

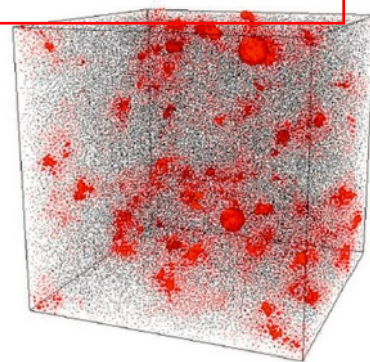


## LA CHALEUR SPÉCIFIQUE DU VERRE

Le transport de la chaleur est l'une des propriétés élémentaires de la matière. De façon générale, il est contrôlé par la chaleur spécifique (aussi nommée « capacité thermique massique »). Une grande chaleur spécifique signifie qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée au prix d'une faible augmentation relative de la température. Il s'agit d'une grandeur importante car directement reliée à la dissipation d'énergie dont les conséquences technologiques sont importantes, notamment pour la stabilité des qubits des ordinateurs quantiques. Depuis les travaux de Peter Debye et d'Albert Einstein, au début du xx<sup>e</sup> siècle nous possédons une théorie de la chaleur spécifique dans les cristaux périodiques. Elle est fondée sur la quantification des excitations élémentaires harmoniques du réseau cristallin et prédit, à basse température autour de 1 kelvin ( $-272^{\circ}\text{C}$ ), une dépendance cubique avec la température. Mais dans les verres, l'évolution est linéaire avec la température. Aux plus faibles températures, le verre possède donc une chaleur spécifique plus grande qu'un solide cristallin, suggérant l'existence dans le verre d'excitations distinctes,

encore mal comprises. Dans les années 1970, Phil Anderson et ses collègues ont proposé un modèle empirique qui attribue ce comportement à l'existence d'une famille de défauts localisés qu'ils nomment « systèmes à deux niveaux » et dont le comportement quantique expliquerait les observations. Des expériences réalisées par Miguel Ramos, de l'université de Madrid, et Frances Hellman, de l'université de Berkeley, sur des films amorphes ultrastables indiquent que la concentration de ces systèmes à deux niveaux est fortement diminuée pour des verres ultrastables. En 2020, Camille Scalliet, Ludovic Berthier et leurs collègues ont étayé ces résultats expérimentaux par des simulations numériques dans lesquelles ils ont identifié pour la première fois les systèmes à deux niveaux directement à l'échelle moléculaire (en rouge sur la figure ci-contre). De plus, en variant systématiquement la stabilité de leurs verres numériques, ils ont démontré une diminution drastique de la quantité de systèmes à deux niveaux pour des verres de plus en plus stables. L'ensemble de ces résultats suggère que la chaleur spécifique des verres quasi idéaux peut

devenir aussi faible que dans un cristal parfait. Par conséquent, la dissipation d'énergie dans ces matériaux est considérablement réduite. Cependant, de façon surprenante, les mesures de Miguel Ramos dans l'ambre géologique, dont on considère que la structure se stabilise au cours de millions d'années, indiquent que la dissipation d'énergie n'est pas sensiblement réduite par rapport à de l'ambre jeune. Ce résultat étonnant reste donc à comprendre, et l'ambre reste donc une énigme à résoudre.



la température de Kauzmann, et qu'ils sont donc très proches de la limite du verre idéal.

Depuis 2007, de nombreux travaux ont établi l'utilité de ces matériaux ultrastables pour plusieurs applications technologiques de grande ampleur. Ainsi les écrans des smartphones de la marque Samsung ont-ils intégré la technologie Oled (diode électroluminescente organique) dont une partie des constituants sont des verres synthétisés par dépôt de vapeur. En 2017, une équipe de l'université de Barcelone a montré comment la technique découverte par Mark Ediger augmente la luminosité et la durée de vie des écrans Oled de plus de 15%. Les films ultrastables sont aussi plus résistants aux dégradations dues à l'exposition à la lumière. Leurs performances accrues sont un indice fort que ces verres ont accédé à une bien meilleure configuration désordonnée.

### DES VERRES ULTRASTABLES

Expérimentalement, il est encore difficile de trouver des preuves directes de la transition de phase vers le verre idéal, mais la synthèse de films amorphes ultrastables permet d'en obtenir des traces indirectes convaincantes. Ainsi, après un réchauffement instantané, ces films vitreux redeviennent liquides du fait d'une dynamique qui est en tout point similaire à celle de la fusion d'un solide cristallin en un liquide (comme la fusion de la

### BIBLIOGRAPHIE

C. Scalliet et al., **Depletion of two-level systems in ultrastable computer-generated glasses**, *Physical Review Letters*, 2020.

G. Parisi et al., **Theory of simple glasses : exact solutions in infinite dimensions**, Cambridge University Press, 2020.

L. Berthier et al., **Configurational entropy of glass-forming liquids**, *Journal of Chemical Physics*, 2019.

A. Ninarello et al., **Models and algorithms for the next generation of glass transition studies**, *Physical Review X*, 2017.

L. Berthier et M. D. Ediger, **Facets of glass physics**, *Physics Today*, 2016.

S. F. Swallen et al., **Organic Glasses with exceptional thermodynamic and kinetic stability**, *Science*, 2007.

glace au-dessus de  $0^{\circ}\text{C}$ ). Cette analogie renforce encore l'idée que la phase vitreuse ultrastable constitue quasiment une phase amorphe de la matière à part entière, et ne se comporte pas simplement comme un liquide dont la dynamique serait très lente.

La simulation numérique représente un autre outil de choix pour étudier la transition vitreuse. Ce domaine a lui aussi connu des avancées importantes au cours des dernières années. Cette approche offre l'avantage de proposer des modèles simplifiés de la réalité, mais où chaque paramètre est parfaitement contrôlé. Surtout, la simulation numérique permet d'avoir une résolution physique à l'échelle atomique tout en étudiant aussi le comportement macroscopique de ces matériaux.

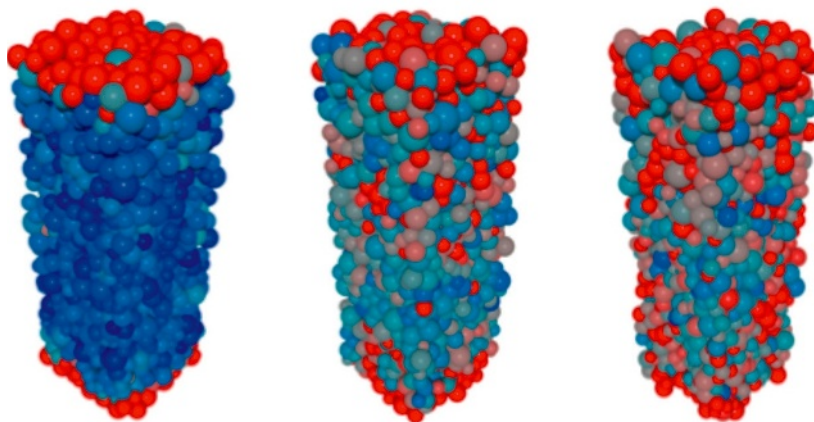
Jusqu'en 2016, les techniques de simulation pour reproduire la physique de la transition vitreuse faisaient face à un obstacle majeur. Les temps de calcul étaient si considérables que les vitesses de refroidissement accessibles en un temps de simulation raisonnable étaient environ cent millions de fois plus importantes que dans les expériences. Une telle différence de huit ordres de grandeur entre la préparation des verres simulés et les verres expérimentaux implique que la simulation produisait des verres bien moins stables que dans les expériences classiques, elles-mêmes bien loin du verre idéal...

Cette difficulté laissait peu d'espoir pour l'approche numérique, mais la situation a radicalement changé en 2016. À l'université de Montpellier, nous avons mis au point un nouvel algorithme de type Monte-Carlo, c'est-à-dire qui repose sur un certain aléa lors de son exécution. Cet algorithme comble l'énorme écart entre simulations et expériences et permet d'étudier numériquement des verres modèles dont la structure est directement comparable aux verres expérimentaux. Mieux, en optimisant encore cet algorithme nous avons été capables, pour certains modèles de verres, de produire des verres considérablement plus stables et plus denses que des verres préparés expérimentalement, le gain en temps de calcul pouvant être supérieur à douze ordres de grandeur (voire quarante ordres de grandeur pour des films en deux dimensions!). Ces verres préparés *in silico* sont donc directement comparables aux films ultrastables obtenus par le groupe de Mark Ediger, et nous permettent d'approcher dans des études numériques bien contrôlées le verre idéal tant recherché. Cette avancée importante nous permet en particulier de tester de façon détaillée la théorie du champ moyen.

## VERRES NUMÉRIQUES QUASI IDÉAUX

Depuis 2016, de nombreux travaux numériques ont permis d'explorer le comportement physique des liquides à des températures qui n'avaient jamais été étudiées auparavant. En particulier, plusieurs études semblent désormais confirmer assez directement la validité de la théorie du champ moyen pour décrire des verres modèles en trois dimensions. Pour ces systèmes, on démontre en refroidissant des liquides au plus proche de la transition vitreuse idéale que toutes les caractéristiques thermodynamiques prédites par la théorie sont bien observées. Nos simulations suggèrent en particulier que l'entropie configurationnelle s'annule à une température de transition finie vers la phase du verre idéal (voir la figure page 69). Cette transition présente les mêmes caractéristiques qu'une transition de phase du premier ordre (comme la transition liquide/solide pour l'eau à 0 °C).

Ces récents développements numériques et expérimentaux jettent une lumière nouvelle sur l'ensemble des propriétés physiques du verre. On peut désormais varier à loisir la qualité du verre préparé pour en étudier ensuite les propriétés macroscopiques. On peut alors se demander si les verres ultrastables, qui se rapprochent au plus près du verre idéal, ont des propriétés différentes des verres ordinaires. La réponse est oui. Nous comprenons désormais que les propriétés



thermiques, thermodynamiques et mécaniques du verre s'expliquent par l'existence d'une petite population d'excitations localisées dans le verre. L'existence de tels «défauts» est pourtant difficile à concevoir puisque la structure microscopique du verre est parfaitement homogène et désordonnée. Il reste difficile de définir les outils numériques ou mathématiques adéquats pour les identifier de manière simple et générique. Pourtant, la simulation numérique montre par exemple que lorsqu'on déforme lentement un verre, la déformation plastique est bel et bien localisée dans quelques endroits rares de l'échantillon, dont le nombre semble diminuer dramatiquement lorsqu'on s'approche du verre idéal. Il est donc tentant de postuler que le verre idéal, tel que prédit par la théorie du champ moyen, serait bien un matériau «parfaitement désordonné» ne comportant strictement aucun défaut : le désordre parfait!

En 2014, l'équipe de Frances Hellman, de l'université de Californie à Berkeley, a démontré que les excitations à l'origine des effets dissipatifs dans le verre à très basse température seraient beaucoup moins nombreuses dans les verres ultrastables. Des résultats similaires ont été obtenus par Miguel Ramos et ses collaborateurs. Notre étude numérique publiée en 2020 (voir l'encadré page 70) soutient ces résultats expérimentaux, suggérant que les effets dissipatifs seraient quasiment absents dans le verre idéal. L'équipe de Berkeley travaille aujourd'hui au développement de revêtements vitreux ultrastables pour les futurs miroirs de l'interféromètre *Ligo*. De tels verres à la dissipation fortement réduite pourraient aussi résoudre les problèmes de la cohérence des qubits dans les futurs ordinateurs quantiques. Même si la quête du verre idéal n'est pas encore arrivée à son terme, elle laisse déjà entrevoir de nombreuses applications pour d'autres secteurs telles que la recherche de pointe ou les télécommunications. ■

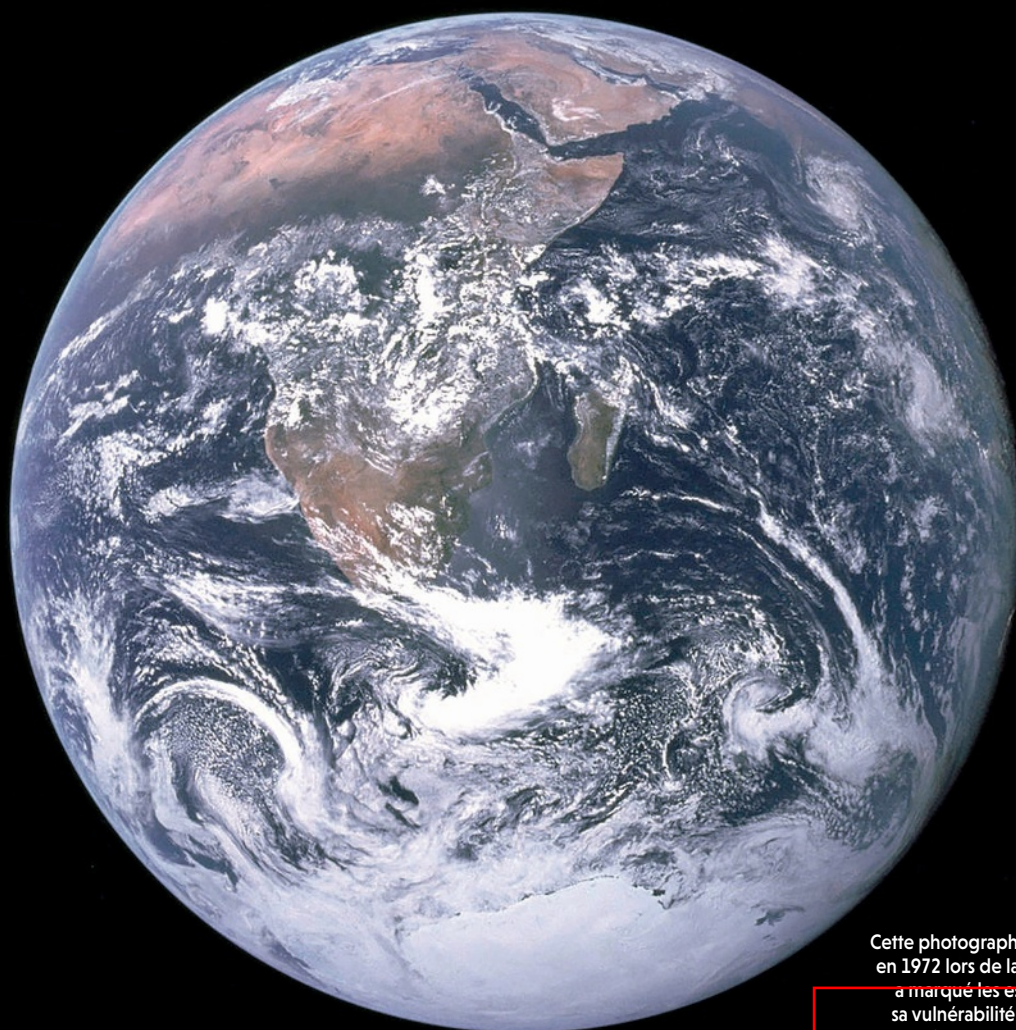
Grâce à une technique de fabrication par dépôt de molécules en phase gazeuse, les verres ultrastables présentent les caractéristiques, notamment la densité, de verres refroidis très lentement. Ludovic Berthier et ses collègues ont développé une simulation numérique fondée sur un algorithme de type Monte-Carlo qui échange la position de différentes molécules dans le matériau. Ce processus aléatoire permet d'explorer rapidement différentes configurations et les énergies associées. Les chercheurs ont ainsi montré que lors de la formation du verre ultrastable, les particules en surface diffusent plus facilement que celles en volume, ce qui permet d'atteindre un état d'équilibre stable (ci-dessus trois simulations réalisées à des températures différentes – la plus basse à gauche, la plus élevée à droite – et où plus une bille est rouge, plus elle est mobile).



# Gaïa

## Enquête sur une révolution silencieuse

Proposée dans les années 1970, l'hypothèse Gaïa, qui compare la Terre à un organisme vivant, irrigue toujours, silencieusement, les savoirs et les politiques actuelles concernant la Terre. Pourquoi une telle discrétion ? Retour sur un concept controversé.



Cette photographie de la Terre, prise en 1972 lors de la mission Apollo 17, a marqué les esprits en soulignant sa vulnérabilité et a renforcé l'idée d'étudier la planète comme un tout.

## L'ESSENTIEL

> Au début des années 1970, le chimiste britannique James Lovelock et la microbiologiste américaine Lynn Margulis ont proposé une nouvelle manière de penser et d'étudier la Terre, prenant en compte l'influence du vivant sur l'environnement global.

> À la suite du récit élaboré par des biologistes, cette « hypothèse Gaïa » a souvent été présentée comme une pseudoscience New Age.

> Pourtant, elle a connu une réception extrêmement riche en sciences de la Terre et a fourni une nouvelle conception de la planète qui a transformé les savoirs et politiques environnementales contemporaines.

> Pourquoi, alors, le mot « Gaïa » semble-t-il avoir disparu de ces sciences après les années 1980 ? La réponse est à chercher dans la biographie même de James Lovelock.

## L'AUTEUR



**SÉBASTIEN DUTREUIL**  
historien et philosophe des sciences, chargé de recherche au CNRS, directeur adjoint du centre Gilles-Gaston-Granger, à Aix-Marseille université

**L**a conférence sur le climat qui s'est tenue à Copenhague en 2009 a marqué un tournant dans l'histoire de la politique climatique. Même si elle a pu paraître décevante, elle a entériné l'objectif visant à maintenir le réchauffement climatique par rapport à la période préindustrielle en dessous de 2°C. Pour la première fois, une limite chiffrée en température était donnée dans le cadre d'un accord international. Mais d'où venait-elle ? Apparue dans les années 1970, elle n'a été mise en avant comme « seuil dangereux à ne pas franchir » que dans les années 1990, notamment par le WBGU, le Conseil allemand sur le changement global. Le climatologue allemand Hans Joachim Schellnhuber, membre de cette institution, a joué un rôle clé dans cette mise en avant. Conseiller d'Angela Merkel, alors ministre de l'Environnement du gouvernement allemand, il l'a convaincue de l'importance de cette limite. L'Allemagne a ainsi été le premier pays à adopter cet objectif, en 1995, suivie par l'Europe en 1996... et le Monde en 2009 à Copenhague, avec la suite que l'on connaît.

Parmi les arguments que Hans Joachim Schellnhuber a avancés pour justifier cet objectif, il en est un particulièrement intrigant. Le climatologue comparait la Terre à un organisme : 2°C semblent peu si l'on compare la température entre l'intérieur et l'extérieur d'une pièce, mais c'est énorme si l'on pense cette augmentation comme la fièvre d'un organisme qui pourrait déstabiliser les « organes » de la Terre. Cette comparaison de la Terre à un organisme, Hans Joachim Schellnhuber l'emprunte directement à l'hypothèse Gaïa – une conception de la Terre proposée dans les années 1970 par deux chercheurs, James Lovelock et Lynn Margulis – sans toutefois toujours la citer explicitement. Gaïa, la personnification grecque de la Terre mère ? Est-ce bien sérieux ? Parle-t-on bien de Gaïa, l'hypothèse controversée ayant donné naissance à une pseudoscience New Age ? Oui, c'est bien elle. Mais en menant l'enquête sur l'histoire de ce concept

et les différents récits qui en ont été faits, on comprend mieux pourquoi... Et on s'aperçoit que Gaïa a profondément irrigué les savoirs et politiques contemporaines de la Terre. En fait, Gaïa nous est devenue si familière et a été tellement intégrée aux discours scientifiques et aux conceptions philosophiques et politiques de la Terre que nous ne la repérons même plus lorsque son nom n'est pas prononcé.

## LES DIFFÉRENTS RÉCITS SUR GAÏA

Plusieurs récits ont été élaborés sur Gaïa. James Lovelock est l'auteur du premier. Né en 1919 et aujourd'hui âgé de 102 ans, ce chercheur britannique raconte dans son autobiographie qu'il a quitté une carrière académique d'ingénieur-chimiste au début des années 1960 pour s'établir comme « scientifique indépendant ». Il a d'abord travaillé comme consultant pour la Nasa, où il a réfléchi à un critère pour détecter la vie sur d'autres planètes. Il a alors compris l'importance de l'influence qu'ont les organismes vivants sur l'atmosphère. La prise en compte de ce fait l'a conduit à l'hypothèse que la vie pourrait réguler l'environnement global, hypothèse popularisée par la comparaison de Gaïa à un organisme qui régule sa température interne. Gaïa l'entité était née : elle évoquait désormais l'ensemble des organismes vivants et l'environnement avec lequel ils interagissent. James Lovelock raconte ensuite qu'à partir du milieu des années 1960, il s'est retiré à la campagne dans le sud-ouest de l'Angleterre, a construit un laboratoire dans son garage et a écrit ses livres sur Gaïa pour proposer une réflexion sur la vie, la Terre et la nature. À partir des années 2000, il affirme que Gaïa est à l'origine d'une reconfiguration importante des sciences de la Terre : la constitution des sciences du système Terre.

Un second récit a façonné l'histoire de Gaïa de manière plus importante encore que celui de James Lovelock. Au début des années 1980, deux biologistes de l'évolution, le Britannique Richard Dawkins et l'Américain Ford Doolittle, ont critiqué l'hypothèse Gaïa. Ils voyaient



l'idée que les organismes vivants puissent agir en vue d'un bien commun – la régulation de l'environnement global – comme la proposition d'une forme d'altruisme et de coopération planétaire. Or ils considéraient que la régulation était une forme « d'adaptation » des organismes, c'est-à-dire un processus qu'un seul mécanisme était capable de produire : la sélection naturelle. Gaïa ne se reproduisant pas, elle ne pouvait être soumise à sélection et n'était donc pas assimilable à un organisme vivant. Apparemment disqualifiée théoriquement, Gaïa s'est ainsi retrouvée, pour nombre de biologistes, rejetée dans le domaine des pseudosciences, n'intéressant au mieux que les « mouvements New Age » : « Gaïa – la grande Terre mère ! L'organisme planétaire ! – Suis-je le seul biologiste à souffrir d'une convulsion désagréable, d'un sentiment d'irréalité, quand les médias m'invitent encore une fois à la prendre au sérieux ? [...] La science marginale, la pseudoscience, l'obscurantisme, l'expression de bons sentiments et le mysticisme trouvent aujourd'hui une faveur presque médiévale y compris chez des gens éduqués », s'exclame le microbiologiste britannique John Postgate en 1988 dans le magazine *New Scientist*.

D'autres récits ont proliféré. En écologie politique comme en philosophie de l'environnement, en particulier, on célèbre Gaïa comme une conception alternative de la nature, remettant en question la vision moderne de celle-ci, celle d'une nature extérieure à l'humanité, constituée d'entités passives et devant être dominée et maîtrisée. En 2013, lors d'une série de conférences à Édimbourg sur « le nouveau régime climatique », depuis rassemblées dans l'ouvrage *Face à Gaïa* (2015), l'anthropologue et philosophe Bruno Latour a ainsi comparé les transformations introduites par Gaïa à celles amenées naguère par Galilée !

## LES PREMIERS PAS DE GAÏA

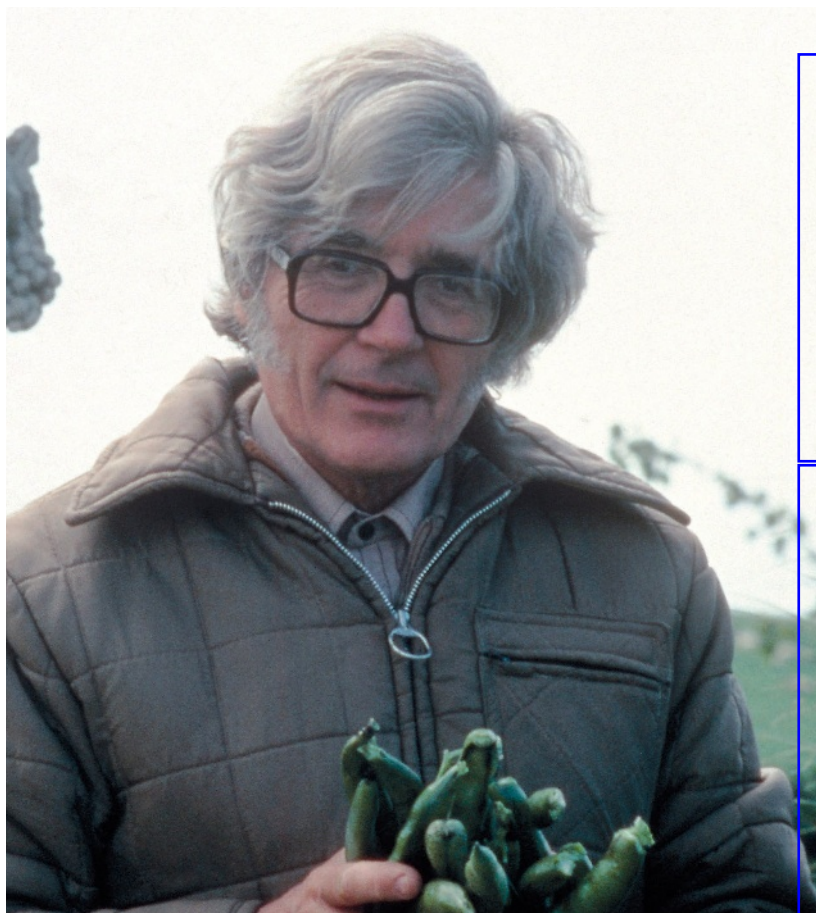
Ces multiples récits s'accordent sur le fait que Gaïa est une proposition importante qui introduit des déplacements de taille : elle déstabiliserait cent cinquante ans de biologie de l'évolution depuis Darwin ; elle aurait transformé en profondeur les sciences de la Terre et une philosophie de la nature vieille de plusieurs siècles. Ils entrent cependant en tension dès qu'il s'agit du statut à accorder à Gaïa : est-elle une hypothèse ? Une théorie ? Un programme de recherche ? Une philosophie de la nature ? Ils ne s'accordent pas non plus sur le public auquel elle s'adresse : Gaïa parle-t-elle aux biologistes ? Aux sciences de la Terre ? Aux philosophes ? À l'écologie politique ? Pour répondre à ces questions, il faut suivre la manière dont Gaïa a été discutée et abordée par les différentes communautés au sein de laquelle elle a connu une réception importante.



Commençons par suivre le label « Gaïa » dans la littérature scientifique. Introduite en 1972 dans un article de James Lovelock, l'« hypothèse Gaïa » a ensuite été élaborée conjointement avec Lynn Margulis dans une série d'articles scientifiques. Ces derniers ont paru dans des revues de sciences de la Terre et des planètes. Les deux chercheurs y proposaient une nouvelle manière de penser et d'étudier la Terre et mettaient en avant l'influence jusque-là négligée des organismes vivants sur l'environnement global. À l'intérieur de ce cadre, ils avançaient une série de mécanismes concrets par lesquels les organismes vivants pourraient effectivement réguler le climat, la composition de l'atmosphère (en oxygène, méthane, CO<sub>2</sub>, etc.) et celle de l'océan (son acidité, sa concentration en nutriments, etc.).

James Lovelock, chimiste de formation basé en Angleterre, et Lynn Margulis, microbiologiste américaine, se complétaient : il apportait le « cadre théorique » et ses connaissances en chimie ; elle habillait ce squelette théorique d'une « chair » en dévoilant la diversité des métabolismes biologiques et leurs richesses au cours de l'histoire longue de la Terre. Gaïa n'était pas un cadre théorique abstrait : James Lovelock et Lynn Margulis ont tout de suite pris très au sérieux les recherches

Coautrice avec James Lovelock de l'hypothèse Gaïa, la microbiologiste américaine Lynn Margulis (ici en 1990), voyait l'évolution comme le fruit non pas d'une compétition entre les organismes vivants, mais d'une coopération entre eux, une symbiose à différentes échelles, dont celle de la Terre.



James Lovelock en 1980, soit un an après la parution de son premier livre sur Gaïa, intitulé *Gaïa: A new look at life on Earth*.

empiriques concrètes. Il a effectué des mesures de chimie de l'atmosphère et des océans en Angleterre, en Irlande, à bord de navires océanographiques ou d'avions stratosphériques; elle a consacré sa carrière à observer des microorganismes au microscope, à documenter leurs modes de vie et leurs interrelations.

Leurs trajectoires se sont séparées peu à peu après la publication du premier livre de James Lovelock sur Gaïa en 1979. Lynn Margulis a porté le flambeau de l'idée qui lui tenait le plus à cœur et pour laquelle elle est restée célèbre, la symbiose, dont Gaïa est une manifestation parmi d'autres. James Lovelock a entraîné Gaïa dans de nouvelles directions: une série d'articles retentissants sur la régulation du climat par les algues et sur la manière dont les organismes vivants influencent l'érosion des roches, et l'élaboration d'un petit modèle, Daisyworld, qui permettait de réfléchir aux mécanismes théoriques par lesquels les organismes vivants pourraient réguler l'environnement et qui répondait ainsi aux critiques des biologistes (voir l'encadré page 76).

Critiques qui, d'ailleurs, n'ont pas eu l'ampleur que le récit standard a laissé croire. Ce récit a imposé l'idée qu'une controverse scientifique avait eu lieu avec les biologistes de l'évolution. Or si l'on regarde la réception de

Gaïa en biologie de l'évolution, elle est dérisoire: hormis les très brèves critiques de Richard Dawkins et Ford Doolittle, plus personne du domaine ne s'est intéressé à Gaïa après les années 1980. Autrement dit, il n'y a pas eu de «controverse» avec les biologistes de l'évolution: ils ne se sont tout simplement pas intéressés à Gaïa, qui portait sur des objets et des questions de sciences de la Terre (la régulation de la composition chimique de l'atmosphère et du climat) et non de biologie de l'évolution, discipline qui s'intéresse à l'explication de l'adaptation des organismes et de la biodiversité.

Ainsi, dans les années 1980, c'est au sein des sciences de la Terre que Gaïa a été l'objet de débats importants. Cependant, en suivant le label «Gaïa» au-delà de cette période, on se retrouve cantonné dans une «petite» littérature scientifique de quelques centaines d'articles théoriques, discutant du statut de Gaïa, ou modifiant le modèle Daisyworld, entretenue par une poignée de scientifiques, pour l'essentiel basés en Angleterre. On semble loin d'une révolution scientifique! De fait, pour comprendre l'importance scientifique réelle de Gaïa, il ne suffit pas d'explorer la bibliographie à la recherche de ses citations. Il faut retracer l'histoire des sciences du système Terre, cette nouvelle discipline qui, selon James Lovelock et les partisans de Gaïa, est née de l'hypothèse Gaïa.

## L'HÉRITIÉR CACHÉ: LES SCIENCES DU SYSTÈME TERRE

Les sciences du système Terre ont émergé dans les années 1980 à partir d'une effervescence institutionnelle: des scientifiques de l'ensemble des disciplines des sciences de la Terre et de l'environnement se sont réunis dans les institutions qui structurent et financent les recherches internationales pour appeler à une révolution de ces disciplines. Cette révolution était considérée comme nécessaire compte tenu de l'émergence des «changements globaux» et de la reconnaissance récente de l'existence d'une nouvelle entité, le «système Terre», constitué de l'ensemble des interconnexions de l'atmosphère, des océans, des organismes vivants et des roches.

Cette effervescence a produit des effets importants à partir du début des années 1990: le financement par la Nasa de nouveaux satellites pour étudier la Terre et la constitution d'une nouvelle institution, le Programme international géosphère-biosphère (IGBP, International Geosphere-Biosphere Programme). Au fil des décennies, la science du système Terre de l'IGBP a fonctionné comme une science complémentaire mais alternative à la physique du climat du Giec, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution



du climat. Pour l'IGBP, le Giec ne prenait pas suffisamment en compte les interconnexions, les effets des organismes vivants sur le système et les non-linéarités ou transitions abruptes. L'IGBP s'est ainsi moins fait connaître par ses rapports de synthèse que par les concepts normatifs qu'il a élaborés : l'« anthropocène », les « limites planétaires » et les « points de bascule ».

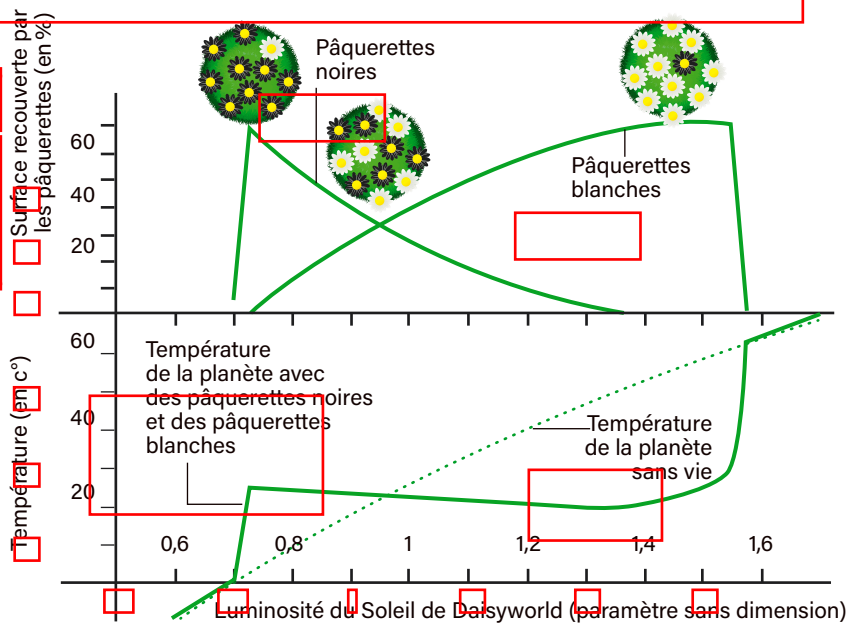
Ces concepts articulent des manières de savoir ou de connaître la Terre, et de s'y rapporter sur le plan anthropologique et politique. L'anthropocène est le nom d'une nouvelle époque géologique, proposé en 2000 par le météorologue et chimiste de l'atmosphère néerlandais Paul Crutzen, colauréat du prix Nobel de chimie en 1995, et le biologiste américain Eugene Stoermer pour marquer l'importance de l'effet de l'humanité sur l'environnement global. Les limites planétaires sont un ensemble de neuf variables (température globale, ozone stratosphérique, acidité des océans, etc.) que nous devons maintenir en dessous d'un certain seuil si nous voulons conserver une Terre habitable (voir l'encadré page 78). Ce sont elles qu'en juin 2020 les cent cinquante citoyens français tirés au sort pour former la Convention citoyenne pour le climat ont proposé d'inscrire dans la Constitution, comme base pour pénaliser l'éco-cide. Quant aux points de bascule, il s'agit d'une liste de grands ensembles – les organes de la Terre – susceptibles d'une transition brutale sans retour possible, comme la fonte de la calotte glaciaire du Groenland, le dépérissement des forêts boréale et amazonienne, le verdissement du Sahara, ou encore le dérèglement de la mousson indienne. Le Giec a d'ailleurs ensuite intégré ces points dans ses rapports.

## GAÏA OMNIPRÉSENTE... MAIS DISCRÈTE

Dans ces sciences, un œil exercé reconnaît aisément la profonde influence de Gaïa : on y retrouve ses slogans, notamment l'importance des organismes vivants, et cette conception de la Terre comme un système interconnecté ; on retrouve aussi, aux postes les plus importants de leurs institutions, des collaborateurs proches de James Lovelock ou des scientifiques qui ont revendiqué l'héritage de Gaïa, comme les Britanniques Chris Rapley, Peter Liss et Tim Lenton... ou Hans Joachim Schellnhuber. On le voit, Gaïa a eu une importance décisive pour l'ensemble des savoirs et politiques contemporaines de la Terre. Pourtant, dans les premières décennies, les mentions explicites de Gaïa ont été rares. Pourquoi cette absence ? Est-ce seulement en raison du discrédit de Gaïa, qualifiée de « pseudoscientifique » par le récit standard popularisé par les biologistes ? Rien n'est moins sûr quand on examine le récit que James Lovelock fait de lui-même.

## LE MODÈLE DAISYWORLD

Au début des années 1980, James Lovelock et son ancien étudiant Andrew Watson ont créé un modèle très simplifié de planète habitée, Daisyworld, pour montrer comment les organismes vivants sur Terre pourraient réguler le climat. Daisyworld est une planète fictive où ne vivent que deux espèces : des pâquerettes blanches et des pâquerettes noires. Les pâquerettes blanches refroidissent la planète en réfléchissant la lumière du soleil, mais croissent plus vite sous un climat chaud. Les pâquerettes noires réchauffent la planète en absorbant la lumière visible et en réémettant dans l'infrarouge, mais croissent plus vite sous un climat froid. Ainsi, la planète fonctionne comme un thermostat : une température stable y est maintenue, même quand la luminosité du soleil augmente.



Imaginer James Lovelock « isolé à la campagne » et retiré du monde n'aide pas à comprendre comment Gaïa a pu acquérir une telle importance : si la sociologie des sciences nous a bien appris une chose, c'est qu'on ne fait pas une révolution reclus dans son garage ! Pourquoi s'est-il autoproclamé « scientifique indépendant » ? Comment travaillait-il concrètement ? Si James Lovelock n'avait pas été connu pour Gaïa, il l'aurait été pour l'une de ses nombreuses inventions dans le domaine des instruments de mesure chimique : le détecteur à capture d'électrons (ou ECD), en 1957. Révolution dans le domaine de l'analyse chimique, l'ECD a permis de dépasser de plusieurs ordres de grandeur les seuils de détection de l'époque. James Lovelock est immédiatement devenu l'expert international pour quiconque souhaitait mesurer des composés en quantité infimes. D'ailleurs, c'est bien pour travailler sur des chromatographes d'une mission martienne que la Nasa l'avait embauché, pas pour s'adonner à des réflexions théoriques sur la définition de la vie !

Rapidement, James Lovelock a multiplié ses employeurs et ses clients: diverses entreprises, notamment chimiques et pétrolières (Shell, Hewlett-Packard, ponctuellement DuPont); les services secrets britanniques; des institutions importantes de la recherche en sciences de la Terre et de l'environnement comme l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) ou le Centre américain de recherche atmosphérique (NCAR). Sa manière de travailler s'inscrit ainsi dans une catégorie émergente: celle des «scientifiques entrepreneurs», dont l'exemple emblématique est celui des créateurs de start-up de biotech dans la Silicon Valley, ayant «un pied dans la production (universitaire) de connaissances, un pied dans la fabrication d'instruments, de services, et finalement d'argent» pour reprendre les termes de l'historien des sciences américain Steven Shapin.

## JAMES LOVELOCK, SCIENTIFIQUE INDÉPENDANT?

Dans les années 1960 et 1970, que vous ayez voulu suivre une masse d'air atmosphérique et en mesurer des composés rares, tracer un individu que vous auriez marqué chimiquement ou détecter des explosifs, réfléchir à des problèmes d'ingénierie chimique dans des usines ou au transport de combustibles fossiles, James Lovelock était l'homme de la situation! Pour comprendre ses activités quotidiennes, il faut se le représenter comme un spécialiste de la «pollution globale». Avec son ECD, l'ingénieur a effectué en 1972 les premières mesures des chlorofluorocarbures (CFC) dans l'atmosphère, qui ont ensuite été mis en cause comme responsables de la destruction de l'ozone stratosphérique. Controverses sur ozone, pluie acide, changement climatique, plomb dans l'essence, smog dans les grandes agglomérations, DDT et autres pesticides: compte tenu de ses activités, tantôt pour les industries mises en cause, tantôt pour les organismes de recherche documentant les dégâts, pas un seul des sujets classiquement rattachés à l'émergence de problèmes environnementaux globaux ne lui a échappé. Et c'est en partie pour aborder ces problèmes dans leur ensemble qu'il a élaboré l'hypothèse Gaïa: elle offrait un cadre pour penser les changements globaux de l'environnement.

Voilà notre énigme historique en partie résolue: comment Gaïa aurait-elle pu transformer en profondeur les sciences de la Terre contemporaines si elle avait été marginale, comme ont persisté à le penser les biologistes, ou si James Lovelock avait vraiment été isolé à la campagne et retiré du monde, comme il nous l'a raconté? Loin d'être marginaux, James Lovelock et Gaïa sont en réalité au centre des bouleversements globaux qui nous préoccupent aujourd'hui! Mais alors, pourquoi cette

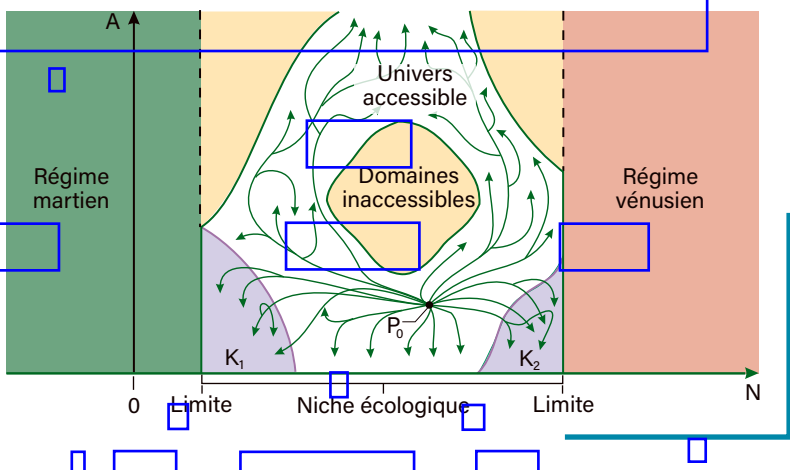
hésitation à citer James Lovelock ou Gaïa de la part de certains scientifiques de la Terre et de l'environnement?

## UNE POLITIQUE GÊNANTE

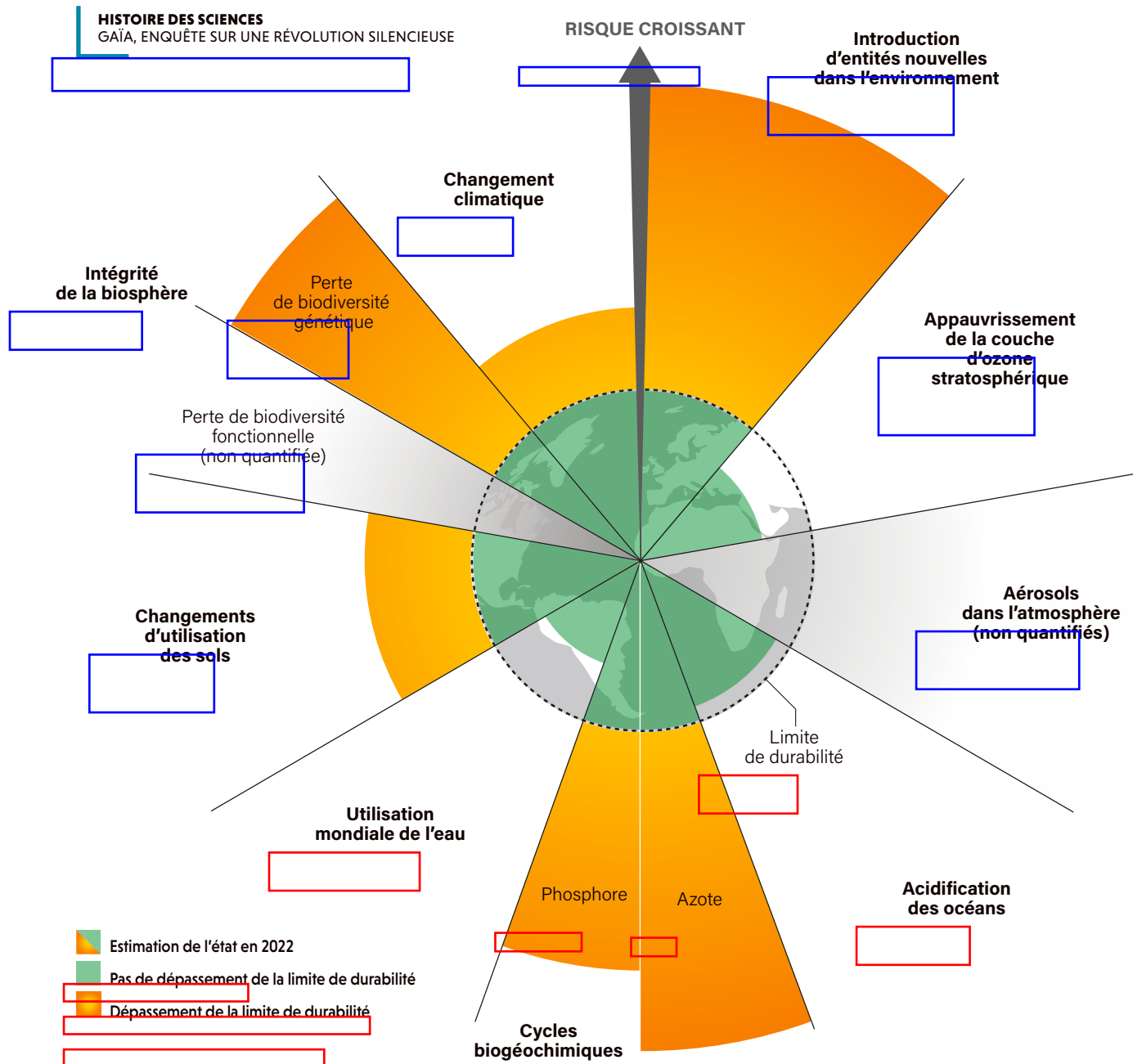
On ne peut rien comprendre à la trajectoire historique de Gaïa, aux controverses scientifiques qu'elle a engendrées et à sa large réception si on ne s'intéresse pas plus en détail à la politique de James Lovelock. Pourquoi se considère-t-il comme un scientifique «indépendant»? D'abord parce que son idéal du chercheur hérite de la figure romantique du savant génial propre au XIX<sup>e</sup> siècle, polyvalent mais isolé et solitaire. Ensuite parce qu'au moment où la controverse sur l'ozone a éclaté, James Lovelock se trouvait dans une position délicate: lui qui avait le premier mesuré les concentrations de CFC dans l'atmosphère défendait, à l'encontre des préconisations de nombreux scientifiques, qu'il n'était pas urgent de légiférer sur l'interdiction de ces gaz, très utilisés dans plusieurs secteurs industriels pour leur stabilité, leur absence de toxicité sanitaire et leur faible coût de fabrication. Son travail pour les industries chimiques – dont certaines sont les plus grandes productrices de CFC – lui a valu d'être accusé de conflit d'intérêts. Il s'en est défendu en mettant en avant son statut de scientifique «indépendant» prodigue: il avait tellement de clients

## LES FUTURS POSSIBLES DU MONDE

Sur cette représentation proposée en 1999 par le climatologue Hans Joachim Schellnhuber, les flèches vertes symbolisent toutes les trajectoires possibles de la Terre à partir du point actuel  $P_0$ , dans un espace défini par un axe «naturel»  $N$  (par exemple la température moyenne globale) et un axe «civilisateur»  $A$  (par exemple la production brute globale). Deux lignes verticales délimitent le domaine viable pour l'humanité entre un régime ultrafroid (martien) et ultrachaud (vénusien). Certaines zones sont inaccessibles. D'autres ( $K_1$  et  $K_2$ ) constituent des «domaines catastrophiques», des zones où l'humanité survivra peut-être, mais dans des conditions peu enviables. Les frontières de ces domaines s'apparentent aux «points de bascule» des sciences du système Terre. Ce schéma illustre à la fois le style très théorique de Hans Joachim Schellnhuber en élaborant une nouvelle conception de la Terre, mais aussi l'importance accordée à l'habitabilité de la planète pour l'humanité, en léger décalage avec la conception de Gaïa qui s'intéressait à l'habitabilité «pour les êtres vivants».







qu'il pouvait abandonner n'importe lequel en cas de doute déontologique.

Son ouvrage *La Revanche de Gaïa*, paru en 2006, a fait réagir les milieux de l'écologie politique. James Lovelock y défend un programme articulant géo-ingénierie, prolifération du nucléaire, abandon des énergies renouvelables et suspension des droits de l'homme et de la démocratie pour faire face à la menace climatique. Nombreux sont ceux qui se sont étonnés que ce programme soit mis en avant par une figure habituellement considérée comme fondatrice de l'écologie politique; moins nombreux sont ceux qui ont remarqué que ces propositions politiques étaient dès le début associées à l'élaboration de Gaïa.

Au-delà de l'ozone dans les années 1970 et 1980, James Lovelock s'est positionné et est intervenu sur de nombreux sujets – changement climatique, pluie acide, etc. –, et a dédouané systématiquement les industries chimiques pour accuser le même coupable: l'agriculture et

la surpopulation qui la sous-tend. Ainsi, décortiquer les controverses scientifiques sur Gaïa permet de saisir que ce sont d'abord et avant tout ses positions politiques – qui ne sont pas très éloignées des «marchands de doute» de l'époque – et leur articulation à Gaïa qui posent problème, bien plus que des embarras théoriques internes à la biologie de l'évolution. C'est pourquoi, au début des années 1980, de nombreux scientifiques de la Terre ont pris leurs distances avec James Lovelock et Gaïa (comme le météorologiste suédois Bert Bolin, qui a pris la tête du Giec à sa création, en 1988, et qui avait pourtant accueilli la première publication sur Gaïa dans sa revue *Tellus* en 1974). Et on comprend aisément leurs raisons: quelles contradictions, quelles tensions, quel cadeau empoisonné! James Lovelock a bel et bien fourni une conception de la Terre, un cadre conceptuel et programmatique qui allaient sous-tendre les recherches sur les changements globaux contemporains... en même temps qu'il a souvent

Les limites planétaires définies par les sciences du système Terre, neuf variables à maintenir en dessous d'un certain seuil pour conserver une Terre habitable.



# Gaïa a reconfiguré nos conceptions modernes de la nature, de la Terre et de la vie

dénié l'importance de ces changements et camouflé l'identité des responsables.

Certains chercheurs ont expliqué ultérieurement leur prise de distance, comme Paul Crutzen qui, au début des années 2000, a confié qu'il n'avait pas pardonné à James Lovelock ses positions sur les CFC. Les scientifiques à l'origine des sciences du système Terre ne pouvant se prévaloir de James Lovelock, ils semblent par ailleurs s'être cherché un fondateur acceptable, en la personne de Vladimir Vernadsky. C'est en effet aussi durant les années 1980 – soit la période de constitution des sciences du système Terre – que les travaux de ce géochimiste russe au début du <sup>xx</sup> siècle, et notamment son concept de biosphère, ont été « redécouverts ». Sans doute pas un hasard...

## UNE PHILOSOPHIE DE LA NATURE

L'énigme est donc résolue. Malgré cette situation compliquée, Gaïa a non seulement transformé les pratiques et les objets des sciences de la Terre, mais aussi, plus largement, reconfiguré nos conceptions modernes de la nature, de la Terre et de la vie. Dans la situation des années 1970 et 1980, où émergeaient les institutions et idéologies des mouvements environnementalistes, une série de discours émanant de contextes extrêmement variés se sont appuyés sur la figure de Gaïa pour remettre en question des piliers importants de la modernité. Le nom de Gaïa, divinité primordiale et figure de la Terre dans la mythologie grecque, a aidé à la cristallisation de différents arguments.

C'est d'abord la conception même de la nature et de la Terre, et ce dont elles sont faites, qui a été interrogée. Durant les <sup>xvi</sup> et <sup>xvii</sup> siècles, la conception « mécanique » de la Terre comme un assemblage de parties passives inanimées a remplacé une vision organique du cosmos qui courait de l'Antiquité à la Renaissance, comme l'a brillamment montré la philosophe et historienne des sciences américaine Carolyn Merchant. Depuis, l'opposition au mécanisme a persisté dans diverses

traditions (comme les philosophies romantiques du <sup>xix</sup> siècle). Gaïa est venue restaurer cette conception féminine, organique et active du cosmos. Ce faisant, elle permettait de remettre en question un ensemble de dualismes modernes, comme la dichotomie entre nature et culture, l'industrie humaine étant mise sur le même plan que les métabolismes bactériens. On a par ailleurs souvent mobilisé Gaïa pour relativiser l'anthropocentrisme de la modernité en rappelant le rôle central des bactéries dans la longue histoire de la Terre. Les humains n'étaient plus extérieurs à la nature, mais pris dans Gaïa, une entité collective au sein de laquelle l'ensemble des organismes vivants sont interconnectés. Les relations de ces derniers n'étaient plus conçues sur le mode d'une exploitation de la nature par l'humanité, mais comme étant faites de dépendance mutuelle.

Gaïa propose donc une vision « unitaire » de la Terre, mais le moins que l'on puisse dire, c'est que la galaxie de communautés qui s'en est saisie n'est, elle, pas unitaire. La même conception de la Terre est à la fois mobilisée lors de rites de sorcellerie néopaiens et embrassée par la théologie chrétienne; défendue par le fondateur du parti vert en Grande-Bretagne et financée et soutenue par Margaret Thatcher; valorisée et publicisée par la contreculture environnementale américaine plutôt libérale en même temps qu'elle est discutée positivement par l'écologie politique britannique la plus réactionnaire; célébrée comme philosophie de la nature en contrepoint de celle de la modernité, tandis que, dans le même temps, James Lovelock est mobilisé comme soutien par les lobbys du nucléaire.

Outre cette diversité, symptôme du caractère malléable de la figure de Gaïa, on peut également s'interroger sur le rapport entre cette philosophie de la nature et les propositions concrètes qui lui sont associées. L'élément qui me frappe le plus est la manière dont certains « gaïens » ont, ces dernières années, apporté leur soutien aux techniques de géo-ingénierie. On pensait ces techniques de modification artificielle du climat (injection de soufre dans la stratosphère, mélange artificiel des océans à l'aide de gigantesques tuyaux en béton, etc.) constituer le paroxysme d'une vision moderne et prométhéenne de la nature. Nous voilà dans une étrange situation: ce qui semblait le plus important, le plus profond, le plus fondamental – ce dont est fait le monde, la manière dont nous le connaissons et dont nous souhaitons nous y relier – ne semble ici pas faire la moindre différence quant aux solutions et actions déployées. Gaïens et prométhéens s'unissent depuis des chemins opposés pour soutenir les mêmes techniques. Le signe que la philosophie de la nature ne change au fond pas grand-chose... ou que gaïens et prométhéens ne sont peut-être pas si différents? ■

## BIBLIOGRAPHIE

T. Lenton et al., *Life on Earth is hard to spot, The Anthropocene Review*, 2020.

S. Dutreuil, *Is the decisive issue in geoengineering debates really one of representation of nature? Gaïa against (or with?) Prometheus?*, *Carbon and Climate Law Review*, 2019.

S. Dutreuil, *James Lovelock, Gaïa et la pollution : un scientifique entrepreneur à l'origine d'une nouvelle science et d'une philosophie politique de la nature*, Zilsel, 2017.

B. Latour, *Face à Gaïa huit conférences sur le nouveau régime climatique*, La Découverte, 2015.

S. C. Aykut et A. Dahan, *Gouverner le climat? Vingt ans de négociations internationales*, Presses de Sciences Po, 2015.



# R

## ENDEZ-VOUS

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

# L'UNIVERS FABULEUX DE $2^n$

En multipliant 2 par lui-même un grand nombre de fois on produit des suites de chiffres aux structures inattendues.

## L'AUTEUR



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



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

**L**a suite des puissances de 2 écrites en base 10 est bien connue, du moins pour ses premiers termes: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024, 2 048, ... Elle est utilisée en informatique, où elle fixe par exemple les unités pour mesurer les quantités de mémoire: un kilooctet (Ko) représente  $2^{10}=1024$  octets (groupes de 8 bits), un mégaoctet (Mo) représente  $2^{20}=1048576$  octets, un gigaoctet (Go) représente  $2^{30}=1073741824$  octets. Viennent ensuite les téraoctets, pétaoctets, exaoctets, zettaoctets, yottaoctets pour  $2^{40}$ ,  $2^{50}$ ,  $2^{60}$ ,  $2^{70}$ ,  $2^{80}$  octets.

L'esprit a des difficultés à saisir ce qu'est la croissance exponentielle des puissances de 2. C'est la base du classique problème des nénuphars: « Un étang est recouvert en 30 jours par un nénuphar qui double la surface occupée chaque jour. Combien faut-il de jours à deux nénuphars pour recouvrir l'étang? » La réponse n'est pas 15 (voir des commentaires dans l'encadré 1).

La fascination pour les puissances de 2 et notre incapacité de saisir la vitesse de croissance sont anciennes. Elles sont au cœur de l'histoire du remplissage de l'échiquier. On trouve des traces de ce récit en Inde dès le XIII<sup>e</sup> siècle. Le créateur du jeu d'échecs aurait demandé à son souverain comme récompense pour son invention que l'on dépose un grain de blé sur la première case de l'échiquier, deux sur la deuxième case, quatre sur la troisième, etc. Le souverain aurait ri de ce qu'il lui semblait un bien maigre prix pour la brillante invention. Après de pénibles calculs, le trésorier lui aurait appris que le

nombre de grains de blé demandés dépassait la production du royaume. Les versions diffèrent pour la fin de l'histoire: l'inventeur serait devenu un conseiller de haut rang ou aurait été exécuté. Pour mener le calcul, on utilise la formule facile à démontrer que:

$$1+2+2^2+\dots+2^n=2^{n+1}-1,$$

$$\text{soit } 1+2+2^2+\dots+2^{63}=2^{64}-1$$

=18446744073709551615 grains de blé au total: plus de 1000 fois la production mondiale annuelle de blé!

Notre difficulté à appréhender ce que représente  $2^n$  apparaît dans une multitude de situations mathématiques (voir l'encadré 3). D'autre part, les chiffres qu'on voit apparaître quand on écrit explicitement  $2^n$  intriguent. Ces chiffres suivent-ils des règles?

## LES CHIFFRES À DROITE DE $2^n$

La réponse est plus complexe qu'on ne l'imagine. Concentrons-nous sur le chiffre le plus à droite, ou chiffre des unités. Ce chiffre est nécessairement pair, bien évidemment. Quelques calculs montrent qu'il suit une règle périodique: la séquence 2, 4, 8, 6 se répète indéfiniment: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048... La démonstration est facile:

$2 \times (10k+2) = 20k+4 = (2k) \times 10 + 4$   
donc le double d'un nombre se terminant par 2 se termine par 4. De  $2 \times (10k+4) = 10 \times (2k) + 8$  on tire que le double d'un nombre se terminant par 4 se termine par 8. Le reste vient avec  
 $2 \times (10k+8) = 10 \times (2k+1) + 6$   
et  $2 \times (10k+6) = 10 \times (2k+1) + 2$ .

En faisant tendre  $n$  vers l'infini, on rencontrera donc comme chiffre des unités de  $2^n$  une proportion de 25% de 2, autant de 4, de 8 et de 6 et une proportion nulle de 0, 1, 3, 5, 7 et 9. C'est ce qu'indique la première ligne du tableau de l'encadré 2.

Considérons maintenant les deux chiffres les plus à droite de  $2^n$ . On découvre sans mal que la suite commence par: 02, 04, 08, 16, 32, 64, 28, 56, 12, 24, 48, 96, 92, 84, 68, 36, 72, 44, 88, 76, 52, 04. En raisonnant comme précédemment, on en déduit donc qu'une fois revenu à 04 tout recommence avec une période 20. En particulier une puissance de 2 ne se termine jamais par 00, par 06 ou par 14 ou n'importe quel couple non présent dans la liste. On remarque que deux des nombres de la période ont 0 comme chiffre des dizaines (04, 08), que deux aussi ont 1 comme chiffre des dizaines (16, 12), etc. La répartition pour le deuxième chiffre de  $2^n$  est donc uniforme, chacun ayant une fréquence d'apparition de 10%. C'est ce qu'indique la deuxième ligne du tableau de l'encadré 2, qui a été calculé directement par ordinateur. On établit par le

raisonnement et on le vérifie avec un programme que les  $k$  derniers chiffres de  $2^n$  donnent un résultat périodique de période  $4 \times 5^{k-1}$ , qui commence à partir du terme  $2^k$ .

En examinant la partie périodique de cette séquence avec un programme, j'ai vérifié pour  $k=3, 4, \dots, 11$  que, comme pour le deuxième chiffre à partir de la droite, chacun des chiffres 0, 1, 2, ..., 9 apparaît exactement avec la fréquence de 1/10 quand on s'intéresse au  $k$ -ième chiffre à partir de la droite de  $2^n$ . Le résultat affirmant que cela reste vrai au-delà de 11 a été démontré par le mathématicien Michael Fuchs en 2002 (voir la bibliographie).

## LES CHIFFRES À GAUCHE DE $2^n$

Venons-en maintenant aux chiffres de  $2^n$  observés à partir de la gauche. Commençons par celui en tête, le premier chiffre significatif: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024, 2 048... Sans réfléchir, on s'attend à ce qu'il y en ait 1/10 de chaque sorte. C'est idiot puisque 0 n'est pas un chiffre possible à gauche. On a alors envie de dire qu'à la suite de ce qu'on a vu pour les chiffres comptés à partir de la

## LE PROBLÈME DU NÉNUPHAR

« Un étang a été recouvert en 30 jours par un nénuphar, qui double la surface occupée chaque jour. Combien aurait-il fallu de jours à deux nénuphars pour recouvrir l'étang ? »

Trop de précipitation peut vous faire répondre 15 jours,

ce qui est faux. La solution du problème est classique : « Le nénuphar seul couvre la moitié de l'étang en 29 jours, pour, en doublant sa surface, recouvrir l'étang entier en 30 jours. Deux nénuphars recouvrent chacun la moitié de l'étang en 29 jours, donc la totalité. » Cependant, ce problème et la certitude que nous avons bien compris la solution de 29 jours illustrent notre mauvaise perception de ce qu'est une croissance en  $2^n$ . On doit en effet formuler deux remarques sur ce problème classique et sa solution.

1. Le rayon d'un nénuphar est d'environ 10 cm, donc sa surface est d'environ  $300 \text{ cm}^2$  ; en trente jours de doublement, la surface du nénuphar de l'histoire occuperait donc  $300 \times 2^{30} \text{ cm}^2$ , soit environ  $30 \text{ km}^2$ . Ce ne serait plus un étang mais un lac de la taille de celui d'Annecy ! Notre incapacité d'évaluer les puissances de 2 nous empêche de percevoir l'absurdité



de l'histoire ou du moins de sa formulation.

2. Lorsqu'une plante ou une épidémie s'étend de proche en proche sur un plan, on parle fréquemment de « croissance exponentielle ». C'est une erreur. Lorsqu'une plante s'étend ou lorsqu'une épidémie contamine une zone de plus en plus grande, la diffusion se fait à une vitesse presque constante autour d'un point de départ. La croissance des surfaces concernées, qui est aussi proportionnelle à celles des sujets concernés dans le cas d'une épidémie, n'est pas exponentielle mais « quadratique ». En effet, la distance au point de départ croît linéairement

(proportionnellement au temps  $t$ ) et donc la surface concernée croît

quadratiquement (proportionnellement à  $t^2$ ). Cette croissance est certes très rapide, mais l'est beaucoup moins qu'une croissance exponentielle (en  $k^t$ ). Le nombre  $100^2$  est par exemple beaucoup plus petit que  $2^{100}$ . L'incapacité de notre esprit à faire clairement la distinction entre les deux modes de croissance conduit à l'erreur courante de parler de croissance exponentielle dans des circonstances inéduquées. Le doublement journalier du nénuphar pendant 30 jours n'est pas un modèle raisonnable pour la façon dont il s'étend.



droite, il y a uniformité entre ceux possibles, 1, 2, ..., 9, et donc: la fréquence de chaque chiffre non nul quand  $n$  tend vers l'infini doit être de  $1/9$ . C'est faux, comme le montre l'exploration numérique par ordinateur.

Ce qui se passe en tête des chiffres de  $2^n$  est surprenant. Les dernières lignes du tableau 1 de l'encadré 2 ont été calculées par programme en prenant les  $2^n$  jusqu'à  $n=30\,000$ . La fréquence n'est pas du tout uniforme pour les chiffres non nuls en première position à gauche (dernière ligne du tableau). Le premier chiffre est un 1 dans plus de 30% des  $2^n$  (case tout en bas à gauche). Les fréquences calculées pour 2, 3, etc. décroissent pour arriver à 4,6% pour le chiffre 9 (case en bas à droite).

Pour l'avant-dernière ligne, le même phénomène de décroissance se produit. Il est cependant moins contrasté. Plus on remonte dans le tableau, plus les proportions s'égalisent en s'approchant toutes de  $1/10$ .

En 1968, le mathématicien russe Vladimir Arnold, associé au mathématicien français André Avez, a démontré que la suite de  $2^n$  satisfait la loi de (Frank) Benford. Celle-ci indique que pour le premier chiffre significatif, la proportion de chiffres  $c$  est  $\log_{10}(1+1/c)$ . Cette loi retrouve, avec deux décimales exactes, les valeurs que l'ordinateur a calculées (pour des précisions sur la loi de Benford, voir la bibliographie).

Pour le deuxième chiffre à partir de la gauche, qui peut maintenant être un 0, nous avons remarqué que la deuxième ligne à partir du bas sur le tableau calculé expérimentalement donne des fréquences décroissantes plus atténuées que la ligne finale: la fréquence des nombres dont le deuxième chiffre à gauche est  $c$  diminue à mesure que  $c$  augmente, passant de 12% pour 0 à 8,4% pour 9.

L'explication est encore donnée par la loi de Benford. En effet la loi de Benford pour les  $2^n$  est vraie dans toute base de numération  $b > 1$ : en base  $b$  la proportion de  $c$  en première position à gauche est  $\log_b(1+1/c)$ . En particulier pour la base  $b=100$ , on connaît donc, grâce au résultat d'Arnold et Avez, la fréquence des chiffres 00, 01, ..., 99 (en base 100, il y a 100 chiffres différents). La fréquence de 0 en deuxième position en base 10 est donc obtenue à partir de la somme des fréquences pour 10, 20, 30, ... 90 en base 100. Pour le chiffre 1 en deuxième position en base 10 à gauche, on considérera les chiffres de la base 100: 11, 21, 31, ..., 91, etc. En faisant les calculs de ce qu'indique la loi de Benford pour la base 100 et en comparant à ce que le programme a donné avec les  $2^n$  de 1 à 30 000, on trouve une concordance très satisfaisante avec deux chiffres significatifs.

Pour le troisième chiffre en base 10 à partir de la gauche, le même genre de considérations

# 2

## LES CHIFFRES À DROITE ET À GAUCHE DE $2^n$

La partie supérieure du tableau du haut indique la fréquence des 0, des 1, des 2, ..., des 9 quand on considère le chiffre des unités (chiffre n° 1 à droite) de  $2^n$ , le chiffre en deuxième position à partir de la droite (chiffre n° 2 à droite) de  $2^n$ , etc. On voit qu'à l'exception de la première ligne (celle du chiffre des unités) chaque chiffre se présente avec une fréquence de  $1/10$  en position  $k$  à partir de la droite.

La partie inférieure du tableau indique la fréquence des 0, des 1, ..., des 9 quand on considère le chiffre le plus à gauche de  $2^n$  (« premier chiffre significatif »), le deuxième, etc. Là, même si cela semble contredire la partie supérieure du tableau, les fréquences sont loin d'être uniformes. Elles le deviennent petit à petit quand on remonte vers le haut du tableau.

Même si cela semble paradoxal, il faut comprendre qu'il n'y a aucune contradiction entre le fait que dans la partie supérieure à partir de la deuxième ligne il n'y a que des  $1/10$ , et le fait que dans la partie inférieure il n'y a aucun  $1/10$ . En effet les chiffres pris en compte pour les calculs de la dernière ligne ne sont pas pris à la même distance à partir de la droite de  $2^n$ . Pour  $2^1, 2^2, 2^3$  le premier chiffre à gauche est le premier chiffre à droite, mais pour  $2^4, 2^5, 2^6$  le premier chiffre à gauche est le deuxième chiffre à droite, pour  $2^7, 2^8, 2^9$  le premier chiffre à gauche est le troisième chiffre à droite, etc.

|                       | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Chiffre n° 1 à droite | 0     | 0     | 0,25  | 0     | 0,25  | 0     | 0,25  | 0     | 0,25  | 0     |
| Chiffre n° 2 à droite | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |
| Chiffre n° 3 à droite | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |
| Chiffre n° 4 à droite | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 0,1   |
|                       | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   | ...   |
| Chiffre n° 3 à gauche | 0,102 | 0,102 | 0,101 | 0,101 | 0,100 | 0,100 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 |
| Chiffre n° 2 à gauche | 0,120 | 0,114 | 0,109 | 0,104 | 0,100 | 0,097 | 0,093 | 0,090 | 0,087 | 0,084 |
| Chiffre n° 1 à gauche | 0,000 | 0,301 | 0,176 | 0,125 | 0,097 | 0,079 | 0,067 | 0,056 | 0,051 | 0,046 |

Fréquence d'apparition des chiffres 0, 1, 2, ..., 9 selon la position considérée dans l'écriture décimale de  $2^n$ .

|               | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $2^{10}$      | 0,0454 | 0,1818 | 0,2727 | 0,0454 | 0,1364 | 0,0909 | 0,1364 | 0,0000 | 0,0909 | 0,0000 |
| $2^{100}$     | 0,0815 | 0,1070 | 0,1096 | 0,0930 | 0,1115 | 0,0930 | 0,0994 | 0,1006 | 0,1089 | 0,0955 |
| $2^{1\,000}$  | 0,0986 | 0,1009 | 0,1020 | 0,0991 | 0,1008 | 0,0993 | 0,1007 | 0,0985 | 0,1004 | 0,0996 |
| $2^{10\,000}$ | 0,0997 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1002 | 0,0999 | 0,1000 | 0,1001 | 0,1001 | 0,1000 |

Fréquence d'apparition des chiffres 0, 1, 2, ..., 9 quand on considère tous les chiffres présents dans les  $2^n$  jusqu'à  $2^{10}$ ,  $2^{100}$ ,  $2^{1\,000}$  et  $2^{10\,000}$ .

à partir de la loi de Benford pour la base 1000 conduit à une évaluation des proportions attendues, que là encore les calculs de l'ordinateur confirment. Plus on va loin vers la droite (donc vers le haut du tableau en partant de la dernière ligne), plus les résultats théoriques donnés par la loi de Benford et les résultats pratiques indiquent que les proportions pour chaque chiffre de 0 à 9 s'approchent de 1/10. Bien qu'un peu compliquée, la situation semble maintenant claire pour les chiffres de  $2^n$  à partir de la droite et à partir de la gauche.

## PROPORTION GLOBALE POUR CHAQUE CHIFFRE

Puisqu'on ne tombe pas toujours sur la loi uniforme, se pose maintenant la question de ce qui se passe si on examine globalement la fréquence des chiffres rencontrés dans les puissances de 2 mises les unes derrière les autres :

1, 2, 4, 8, 1, 6, 3, 2, 6, 4, 1, 2, 8, 2, 5, 6, ...

L'avantage des chiffres pairs à cause du chiffre des unités de  $2^n$ , ou l'avantage du 1 sur le 2, du 2 sur le 3 etc. à cause de la loi de Benford pour les chiffres les plus à gauche de  $2^n$  introduisent-ils des inégalités entre les fréquences de 0, de 1, de 2, etc. dans la suite de tous les chiffres de  $2^n$  pris les uns après les autres? Bien sûr nous avons interrogé notre ordinateur pour le savoir avec  $2^n$  jusqu'à  $n=10000$ .

Le tableau 2 de l'encadré 2 indique ce que nous avons trouvé pour  $n=10$ ,  $n=100$ ,  $n=1000$ ,  $n=10000$ . On voit que rapidement l'écart à la loi uniforme s'estompe pour devenir insignifiant. Il semble à peu près certain qu'en poursuivant pour  $n$  tendant vers l'infini, chaque fréquence tend vers 1/10. Cette observation, à ma connaissance, n'a pas été prouvée.

## TOUT L'UNIVERS?

Toujours au sujet des chiffres de  $2^n$ , une question se pose: est-ce que n'importe quelle séquence de chiffres, par exemple celle correspondant à votre date de naissance, peut se trouver en tête de  $2^n$ , ou à la fin de  $2^n$  ou quelque part dans  $2^n$ ?

Pour la fin (partie droite de  $2^n$  en base 10), la réponse est non. Cela se déduit du résultat que nous avons énoncé sur la périodicité des  $k$  chiffres les plus à droite et tout simplement du fait que  $2^n$  est toujours pair.

Pour le début (partie gauche de  $2^n$  en base 10) en revanche la réponse est oui, et c'est encore une conséquence de la loi de Benford. En effet en base  $b=10^k$  la loi de Benford indique une fréquence d'apparition non nulle pour chaque chiffre. Ces chiffres écrits en base 10 sont des séquences de longueur  $k$  de chiffres décimaux. D'après la loi de Benford, la fréquence n'est jamais nulle et donc on peut affirmer que toute séquence de

# 3

## RENCONTRES AVEC $2^n$

La suite des nombres  $2^n$  se rencontre dans une multitude de problèmes qui pourraient être pris pour la définir. Voici quelques exemples de ces rencontres que vous complèterez avec la page <https://oeis.org/A000079> de l'encyclopédie des suites numériques de Neal Sloane.

•  $2^n$  est le nombre de sous-ensembles d'un ensemble de  $n$  éléments.  
•  $2^n$  est la somme des éléments d'une ligne du triangle de Pascal.

1  
1 1  
1 2 1  
1 3 3 1  
1 4 6 4 1  
1 5 10 10 5 1

Le  $k$ -ième élément de la ligne  $n$ , est la somme du  $(k-1)$ -ième et du  $k$ -ième élément de la ligne  $n-1$ , et vaut  $n! / ((n-k)! k!)$ ; c'est aussi le nombre de sous-ensembles à  $k$  éléments d'un ensemble à  $n$  éléments (au sommet du triangle,  $n=0$  et  $k=0$ ).

•  $2^n$  est le nombre de « compositions de l'entier  $n+1$  », c'est-à-dire le nombre de façons d'écrire  $n+1$  comme une somme d'entiers non nuls en prenant en compte l'ordre des termes. Les 16 =  $2^4$  compositions de 5 sont :  $5 = 4 + 1 = 3 + 2 = 3 + 1 + 1 = 2 + 3 = 2 + 2 + 1 = 2 + 1 + 2$

$= 2 + 1 + 1 + 1 = 1 + 4 = 1 + 3 + 1$   
 $= 1 + 2 + 2 = 1 + 2 + 1 + 1 = 1 + 1 + 3$   
 $= 1 + 1 + 2 + 1 = 1 + 1 + 1 + 2$   
 $= 1 + 1 + 1 + 1 + 1.$

On en tire les dessins représentés en bas de la page.

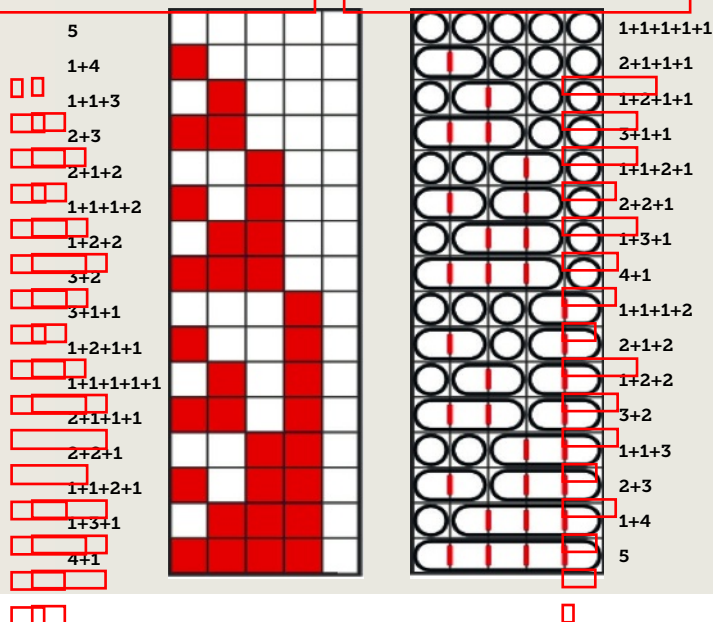
•  $2^n$  est le nombre de permutations de 1, 2, ...,  $n+2$  croissantes puis décroissantes. Pour  $n=3$ , les 8 permutations croissantes puis décroissantes de  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  sont : 12345, 12354, 12453, 12543, 13452, 13542, 14532, 15432.

•  $2^n$  est la seule suite  $x_n$  avec  $x_0 = 1$  telle que la différence de deux termes consécutifs redonne la suite elle-même.

•  $2^n$ , en commençant à  $2^0 = 1$ , est la suite la plus petite dont le  $n$ -ième terme n'est pas la somme de différents termes précédents. En effet avec 1, 2, ...,  $2^{n-1}$ , on peut faire toutes les sommes de 1 à  $2^n - 1$ , mais pas  $2^n$ .

•  $2^n$  est le nombre de permutations de 1, 2, ...,  $n+1$  où aucun élément n'est à plus d'une position d'écart vers la droite de sa position initiale. Par exemple, avec  $n=3$ , sur les 24 permutations de 1, 2, 3, 4, seules  $2^3 = 8$  conviennent (les autres sont barrées) :

1234 1243 1324 1342 1423 1432  
2134 2143 2314 2341 2413 2431  
3124 3142 3214 3241 3412 3421  
4123 4132 4213 4231 4312 4321.





VOTRE PORTRAIT AU DÉBUT DE 2<sup>n</sup>

4

Montrons que tous les triplets de chiffres ne commençant pas par 0 se présentent au début de l'écriture décimale d'au moins un nombre de la forme 2<sup>n</sup>. Il existe 900 de tels triplets : 100, 101, 102, ..., 999. Le raisonnement proposé se généralise sans mal, ce qui conduit à la conclusion que toute séquence finie de chiffres décimaux ne commençant pas par 0, par exemple les pixels de votre portrait en format 1 000 × 1 000 codés avec 10 niveaux de gris, se trouve comme début d'une puissance de 2 : vous êtes dans la suite 2, 4, 8, 16, ... ! (On change éventuellement le premier pixel pour qu'il ne donne pas un 0.)

Ayant codé les lettres par des chiffres, codé aussi les signes de ponctuation, les blancs, les espaces, etc., vous avez dans un début de 2<sup>n</sup> le récit de votre vie !

Considérons les puissances de 2 à partir de 2<sup>10</sup> = 1 024. Elles ont toutes au moins quatre chiffres.

Considérons les 9 001 puissances de 2 à partir de 1 024, donc de 2<sup>10</sup> à 2<sup>910</sup>. Ces puissances donnent 9 001 nombres ne commençant pas par 0. Il y a nécessairement deux de ces nombres, disons 2<sup>a</sup> et 2<sup>b</sup>, a > b, qui commencent par les quatre mêmes chiffres, car il n'y a que 9 000 débuts possibles de quatre chiffres dont le premier chiffre n'est pas un 0. C'est une application du principe des tiroirs de Dirichlet : si vous rangez n + 1 objets dans n tiroirs, l'un des tiroirs contient deux objets ou plus.

Divisons le plus grand par le plus petit Q = 2<sup>a</sup>/2<sup>b</sup> = 2<sup>a-b</sup>. Souvenez-vous de la façon dont on fait les divisions. J'affirme que le quotient Q commencera soit (cas 1) par un 1 suivi de trois 0 soit (cas 2) par trois 9. Si vous avez des doutes, posez la division de 2 345 498 par 234 522 et commencez le calcul ou demandez à votre ordinateur et faites de multiples contrôles.

Mon affirmation peut se démontrer rigoureusement sans trop de mal si on le souhaite.

Supposons que nous sommes dans le cas 1. Le quotient Q est une puissance de 2 et s'écrit donc Q = 2<sup>a-b</sup> = 1 000s, où s est une suite finie de chiffres. Si on considère maintenant les puissances de Q : Q, Q<sup>2</sup>, Q<sup>3</sup>, ... (ce sont des puissances de 2), nous affirmons que leurs trois premiers chiffres vont passer successivement par 100, 101, 102, 103, ... jusqu'à 999, chaque triplet apparaissant une ou plusieurs fois consécutivement, ce qui terminera le raisonnement.

La raison de ce défilement est que quand on multiplie un nombre quelconque A commençant par les trois chiffres a, b et c, par exemple 249, par un nombre commençant par 1 000, par exemple 1 000 458, le résultat commence par abc ou abc + 1 c'est-à-dire 249 ou 249 + 1 = 250 dans notre

exemple. En effet, multiplier A par un nombre commençant par 1 000 si on néglige la position de la virgule revient à le multiplier par 1,000xyz... c'est-à-dire à ajouter au nombre A un pourcentage de sa valeur inférieur à 1/1 000. Dans notre exemple multiplier par 1 000 458 si on néglige la position de la virgule revient à multiplier A par 1,000458, ce qui ajoute à A, 0,0458 % de sa valeur, donc moins de 1/1 000. En ajoutant moins de un millièm de sa valeur à un nombre on ne change par ses trois premiers chiffres abc, ou cela fait passer de abc à abc + 1 (dans notre exemple on reste à 249 ou on passe à 250). Le cas 2 se traite de la même façon, mais la multiplication est maintenant équivalente à une soustraction de moins de un millièm et donc les trois premiers chiffres vont passer de 1 000 à 999, 998, ..., 100. Ce raisonnement est dû à David Gale (voir la bibliographie).

k chiffres décimaux apparaît une infinité de fois en tête de 2<sup>n</sup>. Si par exemple on s'intéresse à 2021, la fréquence de la présence en tête de 2<sup>n</sup> est égale à :

$\log_{10\,000}(1+1/2021) = 0,00005370943$  soit 0,0053 %. Faible, mais pas nulle ! Une démonstration directe que toute séquence de chiffres décimaux se trouve en tête de 2<sup>n</sup> pour au moins un certain n est proposée dans l'encadré 4. Elle repose sur le principe de tiroirs.

Considérons une dernière question à propos des chiffres de 2<sup>n</sup> : faut-il attendre longtemps pour par exemple trouver tous les couples, ou tous les triplets, etc., et quelles sont les séquences les plus longues à apparaître ?

Voici les réponses pour les couples, les triplets et les quadruplets, calculées par machine :

- Pour voir apparaître tous les chiffres, il faut attendre 2<sup>15</sup> = 32 768. Ce nombre contient pour la première fois un 7, qui est en quelque sorte le chiffre retardataire.

- Pour voir apparaître tous les couples de chiffres 00, 01, ..., 99, il faut attendre 2<sup>16</sup>, qui contient pour la première fois 78, le couple retardataire.

- Pour voir apparaître tous les triplets de chiffres 000, 001, ..., 999, il faut attendre 2<sup>21</sup>, qui contient pour la première fois 548, le triplet retardataire.

- Pour voir apparaître tous les quadruplets de chiffres 0000, 0001, ..., 9999, il faut attendre 2<sup>809</sup>, qui contient pour la première fois 9634, le quadruplet retardataire.

## NOMBRES UNIVERS, EQUIREPARTITION, NORMALITÉ...

Pour bien comprendre ce que nous savons et ce que nous ignorons pour les chiffres de 2<sup>n</sup>, nous noterons Puis2 le nombre réel obtenu en plaçant les uns derrière les autres les chiffres de 2<sup>n</sup> après un zéro et la virgule :

Puis2 = 0,1248163264128256...

Le tableau 2 de l'encadré 2, résultat d'un calcul de l'ordinateur, suggère que Puis2 est un nombre «équiréparti» : chaque chiffre apparaît avec la fréquence 1/10. Aujourd'hui, personne ne l'a démontré.

Quatre autres questions se posent naturellement concernant un nombre réel : est-il universel ? Est-il normal ? Est-il irrationnel ? Est-il transcendant ? Rappelons que par définition un nombre est «universel» (ou «nombre univers») s'il contient toute séquence finie possible de chiffres. Un nombre est normal au sens d'Emile Borel si on y rencontre chaque séquence de k chiffres avec la fréquence 1/10<sup>k</sup> (donc fréquence 1/100 pour 34, 79, 12, etc., fréquence 1/1000 pour 123, 777, 219, etc.). Un

David Gale (1921 - 2008)

Pour les nombres  $\pi$  et  $e$  (qui sont transcendants), pour  $\sqrt{2}$ , et plus généralement pour  $\sqrt[k]{k}$

Une multiplication par 2 plusieurs fois de suite est une opération élémentaire, mais ce n'est pas le cas de ce qui en résulte! Les problèmes que les puissances de 2 suggèrent sont innombrables, et nous en chercherons encore longtemps les solutions complètes. ■

V. Arnold et A. Avez,  
**Ergodic problems**  
**of classical mechanics**,  
Princeton University 1968.



## L'AUTEUR



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

# LA SUPPLICATION DES PUNAISES

L'artiste suisse Cornelia Hesse-Honegger, en documentant les difformités d'insectes observés près de sites nucléaires, bouscule l'idée selon laquelle seules les fortes irradiations ont de grands effets.



Dans *La Supplication*, paru en 1998, la Biélorusse Svetlana Alexievitch, Prix Nobel de littérature en 2015, donne la parole aux victimes (liquidateurs, physiciens, citoyens...) et à leurs proches de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl survenue en avril 1986. En cherchant à reconstituer les conséquences de cet accident sur leur vie, elle met en lumière les souffrances des survivants.

L'artiste suisse Cornelia Hesse-Honegger se livre, à sa manière, au même exercice, mais en s'intéressant aux insectes. L'histoire commence à la fin des années 1960, à l'Institut zoologique de l'université de Zurich, en Suisse, où elle est illustratrice scientifique. Un de ses premiers travaux est de rendre compte des effets induits sur les drosophiles par

un composé mutagène, le méthanesulfonate d'éthyle: ces premiers «quasimodos», comme on les appelle, décideront de la suite.

Une seconde étape cruciale est son voyage à Österfärnebo, en Suède, en 1987, l'endroit d'Europe occidentale où les retombées radioactives de Tchernobyl auraient été les plus importantes. Et de fait, sur place, elle repère des fleurs anormales, des trèfles à feuilles rouges et fleurs jaunes au lieu des habituelles feuilles vertes et fleurs roses. Et puis des insectes difformes, notamment des punaises, l'espèce pour laquelle la Suisse a une prédilection (voir la reproduction ci-dessus), car ces arthropodes, du fait de leur régime alimentaire, sont vulnérables aux polluants absorbés par les plantes. Les anomalies qu'elle observe chez

diverses espèces sont spectaculaires! Pattes, yeux, ailes, antennes... aucun organe ne semble épargné.

Depuis, Cornelia Hesse-Honegger n'a cessé de rendre compte par sa peinture des conséquences des retombées radioactives. Après la Suède, elle a arpenté les sites de catastrophes majeures, comme ceux de Sellafield, dans l'ouest de l'Angleterre, où un grave accident a eu lieu en 1957, et de Three Mile Island, en Pennsylvanie (le cœur d'un réacteur y a partiellement fondu en 1979), les environs du site d'essais nucléaires du Nevada, et plus récemment la région de Fukushima, au Japon...

Elle a également recueilli des spécimens près des installations nucléaires fonctionnant normalement et décrites comme «sûres», en Suisse, en France



Différentes formes de perturbations sur une punaise écuyère *Lygaeus equestris*, à Tubre, en Italie, après le passage du nuage radioactif de Tchernobyl en 1986 (ailes froissées, cloques, trous, perturbation du pigment et de la chitine...).

(près de l'usine de retraitement de la Hague), en Allemagne, en Italie... Résultat? Près de 20% des insectes y présentent des difformités!

Pourtant, les autorités, dont la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), considèrent que les dangers sont négligeables en deçà d'un seuil de radiation, un seuil déduit à partir d'une extrapolation des données sanitaires, comme celles recueillies après les bombardements de Hiroshima et de Nagasaki, c'est-à-dire des expositions intenses et rapides.

Mais tous les scientifiques ne sont pas d'accord, notamment ceux qui s'inspirent des travaux du médecin canadien Abram Petkau, qui découvrit au début des années 1970 que les membranes cellulaires étaient beaucoup plus endommagées par

un rayonnement prolongé à faible intensité que par une brève exposition à un rayonnement plus intense, à dose globale égale. En d'autres termes, une exposition chronique à de faibles doses de radioactivité serait au moins aussi dangereuse qu'une exposition brève à des doses plus élevées. Et c'est bien ce que l'artiste a repéré: les difformités des insectes à proximité des lieux d'accident ou de sites «intacts» sont du même ordre, en intensité et en nombre.

C'est ce message qu'aimerait faire passer Cornelia Hesse-Honegger, qui se revendique «artiste scientifique», à travers ses aquarelles qu'elle place dans la lignée de l'art concret, celui de son père Gottfried Honegger et de Mondrian (quand elle peint, elle se détache de l'insecte et ne voit que formes et couleurs en

tant que telles) et de l'art conceptuel (l'idée véhiculée doit primer sur l'œuvre). Quel que soit l'héritage artistique, ces œuvres sont au moins un appel à étudier plus en détail les causes et les mécanismes des perturbations qu'elles donnent à voir.

Si Svetlana Alexievitch a mis en mots un désastre dont on a caché ou au moins atténué l'ampleur – et revenu sous les feux de l'actualité à l'occasion de l'invasion de l'Ukraine par la Russie –, Cornelia Hesse-Honegger le traduit en images... ■

H. Raffles, *Créatures de Tchernobyl – L'art de Cornelia Hesse-Honegger*, Wildproject, 2022.

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





## LES AUTEURS



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

# LA ROUE TOURNE... ET LA FORTUNE DIMINUE

Dans les anciens compteurs électriques, un délicat jeu de champs magnétiques faisant tourner une fine roue métallique aidait à mesurer la consommation. Ce n'est plus le cas dans les modernes Linky.

Tous les compteurs de consommation électrique d'ancienne génération, dits «électromécaniques», sont progressivement remplacés par des compteurs numériques «communicants», les fameux Linky. C'est l'occasion de découvrir le principe de fonctionnement de ces nouveaux compteurs, mais aussi, avant leur disparition complète, des anciens. Et répondre à l'obsédante question que beaucoup d'entre nous se sont posée: qu'est-ce qui fait tourner le disque métallique de ces derniers et pourquoi leur vitesse de rotation rend-elle compte de la consommation électrique?

Dans le principe, rien de plus simple que de déterminer la puissance électrique consommée par un appareil: elle est le produit à chaque instant de la valeur de la tension électrique ( $U$ ) à ses bornes par la valeur du courant électrique qui le

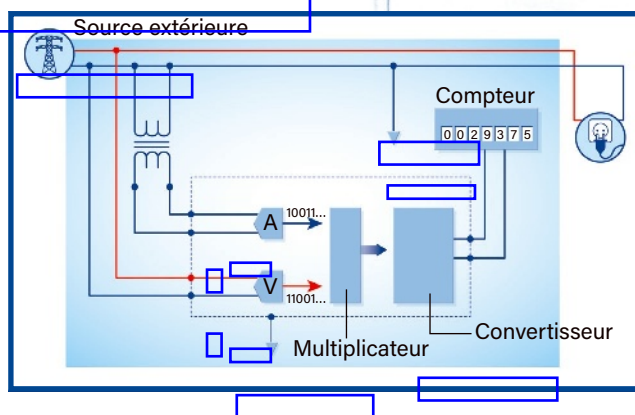
traverse ( $I$ ). En pratique, par exemple pour une lampe, on détermine simultanément la tension à l'aide d'un voltmètre placé en dérivation et le courant qui circule dans l'appareil en insérant dans le circuit un ampèremètre en série. La puissance  $U \times I$  est alors calculée à la main ou avec une machine.

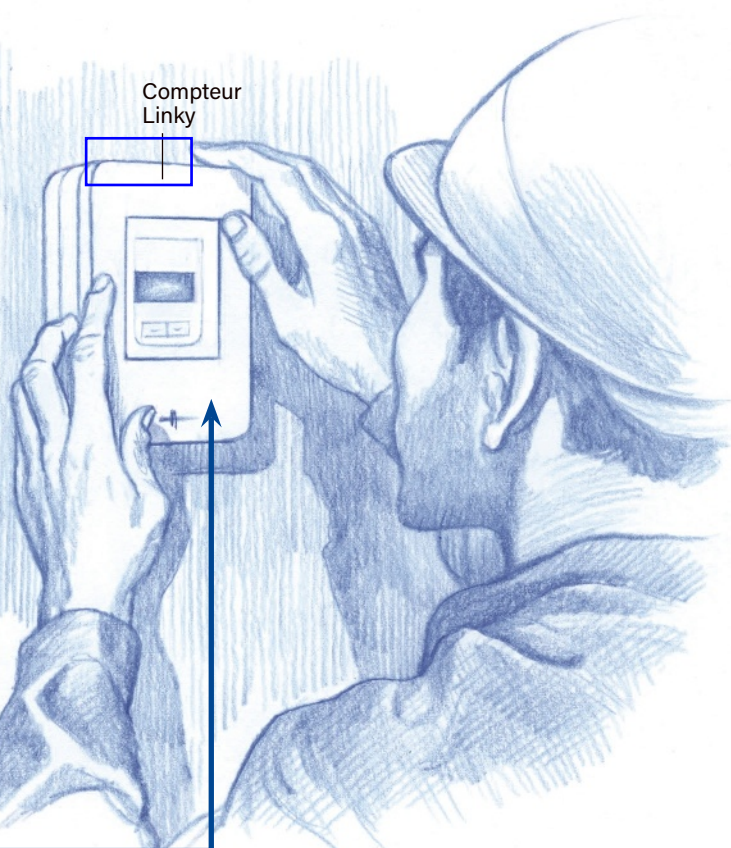
## NUMÉRIQUE CONTRE AIMANTS

C'est exactement ce que font les compteurs électriques modernes (voir la figure ci-dessus). Ils sont positionnés entre l'arrivée de la ligne électrique extérieure et l'installation domestique. Deux convertisseurs analogique/numérique traduisent courant et tension en nombres qui sont ensuite multipliés. Dans un compteur Linky, cette opération est

effectuée plusieurs milliers de fois par seconde. L'énergie totale consommée, exprimée en kilowattheures, est alors l'addition de toutes les valeurs mesurées multipliées par la durée qui sépare deux mesures successives. La numérisation facilite grandement la mesure de la puissance. Mais comment les compteurs électromécaniques s'y prenaient-ils pour faire de même, de façon totalement analogique, sans puce électronique?

Vue de l'extérieur, l'opération semble dépendre d'une fine roue métallique dentée dont nous voyons la tranche et qui tourne d'autant plus vite que la consommation électrique est importante. Pour comprendre comment cela est possible, ouvrons le dispositif (voir la figure page ci-contre). Un axe vertical traverse la roue métallique en aluminium. Il entraîne le





Compteur Linky

Un technicien vient remplacer un ancien compteur par un nouveau, le célèbre Linky. Dans ce dernier, placé à l'entrée de la ligne, la tension du courant et son intensité sont mesurées respectivement par un voltmètre (V) et un ampèremètre (A), dont les valeurs sont numérisées. Reste alors à les multiplier pour obtenir la puissance électrique consommée.

mécanisme de l'afficheur au moyen d'un pignon lorsque le disque tourne. Aucun contact électrique ne relie le disque au circuit: en revanche, nous pouvons constater la présence d'un aimant fer à cheval dont les pôles encadrent la roue et d'électroaimants constitués de bobines de fil entourant un cœur de fer doux. Il y a donc du magnétisme dans l'air.

Par quel principe physique les champs magnétiques créés par ces différents aimants animent-ils le disque? Par l'intermédiaire de courants électriques induits: les courants de Foucault. Ces courants apparaissent dès qu'un conducteur électrique se trouve dans un champ magnétique qui varie au cours du temps. Cela correspond à plusieurs situations: des électroaimants alimentés par un courant alternatif, le

mouvement d'un aimant à proximité d'un conducteur ou, ce qui est rigoureusement équivalent, au mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique statique (indépendant du temps) mais inhomogène (qui varie dans l'espace).

## COURANTS INDUITS ET FREINS MAGNETIQUES

Une expérience permet de saisir l'essentiel de ce phénomène. Considérons un conducteur en mouvement par rapport à un aimant. Par exemple, la roue du compteur, qui lorsqu'elle tourne voit une partie de sa périphérie se déplacer dans l'entrefer de l'aimant fer à cheval. Si nous nous déplaçons avec le conducteur (la roue), nous constatons que, sur celui-ci, la région où est présent le champ magnétique se déplace. À la frontière de cette zone, le

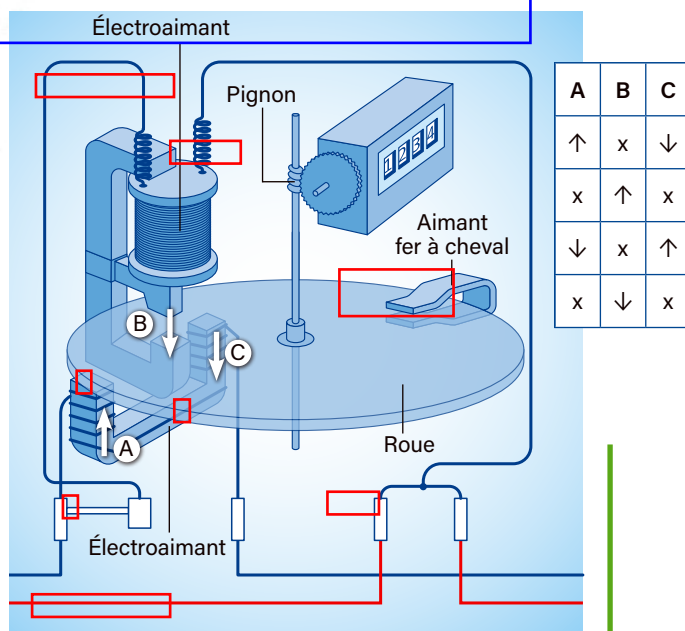
champ magnétique évolue rapidement. Par exemple, dans la région où la roue sort de l'entrefer de l'aimant, le champ magnétique diminue jusqu'à s'annuler. Il en résulte dans le conducteur une boucle de courant induit (voir la figure page suivante), le courant de Foucault, dont une moitié est dans le champ magnétique de l'aimant et l'autre moitié à l'extérieur.

Or un champ magnétique exerce une force sur un courant électrique, la force de Laplace, une force perpendiculaire à la fois au courant et au champ magnétique.

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

## PIGNON SUR ROUE

Dans un compteur d'ancienne génération, une roue en aluminium est mise en rotation par des électroaimants branchés comme le seraient un voltmètre (en haut) et un ampèremètre (en bas). Les champs magnétiques créés (en A, B et C) oscillent (dans le tableau à droite sont indiquées leurs orientations successives) et mettent en mouvement la roue avec une force proportionnelle au produit de la tension et de l'intensité du courant: le nombre de tours indique bien (via un pignon) l'énergie électrique consommée.





Comme seule une moitié de la boucle de courant est dans le champ magnétique, la force totale subie n'est pas nulle. Étant donné la géométrie, cette force est opposée à la vitesse de déplacement et donc tend à ralentir le conducteur. Ce résultat est en accord avec la loi de Lenz, du nom du physicien germano-balte Heinrich Lenz, qui stipule que l'effet du courant induit est de s'opposer aux variations pour le conducteur du champ magnétique (ici provoqué par le mouvement relatif de l'aimant et du conducteur).

Il en est de même dans la zone où le conducteur pénètre dans l'entrefer. Comme le courant est proportionnel à la vitesse de variation du champ magnétique, qui est reliée ici à la vitesse du conducteur, c'est aussi le cas pour la force de freinage. Ce faisant, nous avons ici confectionné un frein à courant de Foucault comme ceux que l'on trouve dans les camions ! Plus le conducteur va vite, plus le freinage sera fort.

## L'EFFET DES BOBINES

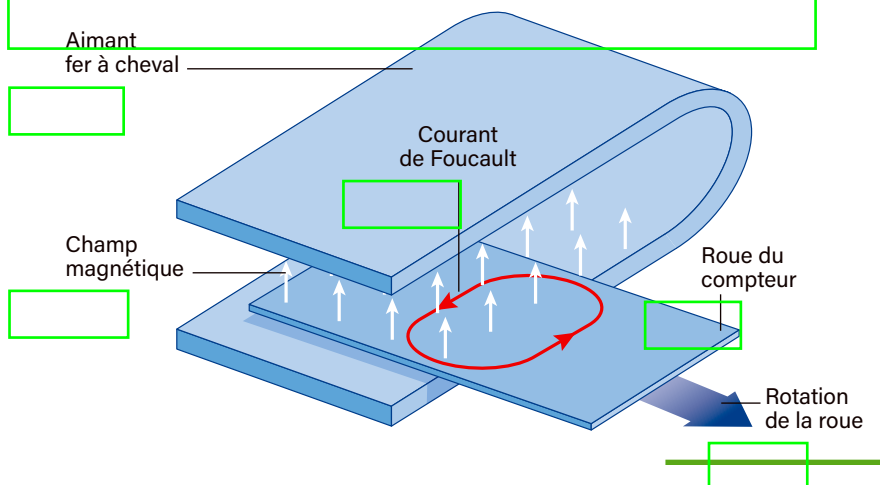
Nous sommes maintenant en mesure d'analyser l'effet des bobines présentes dans le compteur. Comment sont-elles alimentées ? Comme dans le compteur numérique, les fils alimentant ces bobines sont branchés comme l'étaient respectivement le voltmètre et l'ampèremètre. Le dispositif du bas est constitué de deux bobines réalisées avec un très bon conducteur électrique et très peu d'enroulement (et donc une impédance électrique elle aussi négligeable) autour d'un noyau de fer doux en forme de fer à cheval. Elles sont branchées de façon à être traversées par une partie du courant. Il en résulte deux zones de champ magnétique proportionnelles au courant et de directions opposées.

La bobine du haut est quant à elle composée d'un très grand nombre de tours et est branchée pour prélever la tension. La tension appliquée aux bornes de cette bobine est à l'origine d'un courant électrique. Mais lorsque l'on branche une bobine, le courant n'apparaît pas instantanément : il croît (ou décroît) proportionnellement à la valeur de la tension. Le résultat final est donc une zone de champ magnétique située entre les deux zones créées par les bobines du bas, et où le champ magnétique est « déphasé » d'un quart de période par rapport aux deux autres.

Que se passe-t-il quand on fait fonctionner un appareil dans notre appartement ? Des champs magnétiques oscillants vont être créés dans trois zones contiguës (A, B et C dans la figure de la

## UN FREIN AU COURANT

La roue d'un ancien compteur est enchâssée dans un aimant fer à cheval statique. Le champ magnétique appliqué au conducteur diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'aimant, puis s'annule. Lorsque la roue tourne, une boucle de courant induit se forme dans la roue, un courant de Foucault, dont une partie déborde de l'aimant. Selon la loi de Lenz, la force de Laplace due à l'action du champ magnétique sur le courant s'oppose au déplacement de la roue : elle est freinée !



page précédente) et qui se superposent partiellement. Si l'on observe la géométrie de ce champ et son évolution dans le temps, on constate qu'il semble avancer d'une zone à l'autre et toujours dans la même direction. Autrement dit, c'est comme si on déplaçait un aimant à la surface du conducteur. Or de même qu'un aimant fixe freine un conducteur qui bouge, un aimant qui bouge met en mouvement un conducteur. Dans le détail, le mécanisme est le même que celui du freinage : le courant créé par l'une des zones de champ magnétique subit une force de la part du champ magnétique présent dans la zone adjacente. On se convainc alors que la force est bien proportionnelle au produit des champs créés dans les zones adjacentes et donc au produit du courant par la tension donc *in fine* à la puissance. La roue est si légère qu'en permanence cette force motrice est compensée par celle de freinage due à l'aimant fer à cheval : la vitesse de la roue (respectivement la distance parcourue ou encore le nombre de tours qu'elle effectue) est en fin de compte proportionnelle à la force motrice, c'est-à-dire à la puissance (respectivement à l'énergie consommée). On trouve d'ailleurs la constante de proportionnalité inscrite bien en évidence sur les compteurs anciens. Il faut faire vite pour les regarder une dernière fois, car déjà plus de 8 Français sur 10 sont équipés du compteur Linky ! ■

## BIBLIOGRAPHIE

F. Garcia et al., **Power Metering: History and Future Trends**, Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2017.

# Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION  
DÈS MAINTENANT!**



N° 533 (Mars 22)  
réf. PL533



N° 532 (Fév 22)  
réf. PL532



N° 531 (Jan. 22)  
réf. PL531



N° 530 (Déc. 21)  
réf. PL530



N° 529 (Nov. 21)  
réf. PL529



N° 528 (Oct. 21)  
réf. PL528



N° 527 (Sept. 21)  
réf. PL527



N° 526 (Août 21)  
réf. PL526



N° 525 (Juillet 21)  
réf. PL525



N° 524 (Juin 21)  
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)  
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)  
réf. PL522

À retourner accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,40 €**

**1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES** à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1<sup>re</sup> réf. 01 x 9,40 € = 9,40 €  
 2<sup>e</sup> réf.    x 9,40 € =    €  
 3<sup>e</sup> réf.    x 9,40 € =    €  
 4<sup>e</sup> réf.    x 9,40 € =    €  
 5<sup>e</sup> réf.    x 9,40 € =    €  
 6<sup>e</sup> réf.    x 9,40 € =    €  
**TOTAL À RÉGLER**    €

**2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES**

☐ M. ☐ Mme  
 Nom :     
 Prénom :     
 Adresse :     
 Code postal    Ville :     
 Téléphone     
 Courriel :     
 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  
 en nous retournant ce bulletin complété

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.

Offre valable jusqu'au 21/12/2022 en France Métropolitaine uniquement.  
 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 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, 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](mailto:protection-donnees@pourlascience.fr).



Pour retrouver tous nos numéros  
 et effectuer un paiement par carte bancaire,  
 rendez-vous sur [boutique.groupepourlascience.fr](https://boutique.groupepourlascience.fr)



## L'AUTEUR



**HERVÉ LE GUYADER**  
professeur émérite  
de biologie évolutive  
à Sorbonne Université,  
à Paris

# LE FOSSILE IMPROBABLE

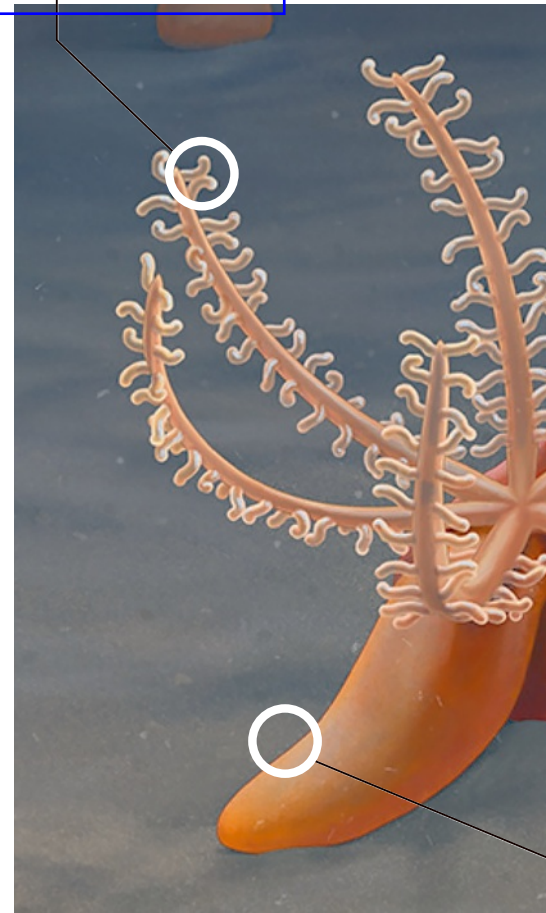
Une trompe, des bras, des tentacules... Un petit animal marin vieux de plus de 500 millions d'années rassemble de bien curieux traits anatomiques. Et résout une énigme ancienne qui résistait même à la génomique.

**D**ès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la paléontologie, l'étude de la vie sur des temps géologiques, a été une discipline clé pour connaître l'histoire évolutive du vivant. Imaginez que l'on n'ait pas eu accès aux fossiles de vertébrés: on ne saurait pratiquement rien sur l'origine des mammifères et des oiseaux, sur la construction des membres ou du crâne... Avec l'avènement de la génomique et de la phylogénie moléculaire (l'étude des liens de parenté des organismes à travers la comparaison de leurs génomes), cependant, on pourrait penser que l'étude comparative des fossiles est passée au second plan pour trancher les points épineux de l'arbre du vivant. Or un minuscule fossile vieux de

506 millions d'années vient de brillamment prouver qu'il n'en est rien, en résolvant une énigme posée dès le XIX<sup>e</sup> siècle: l'incroyable faune de la branche des hémichordés.

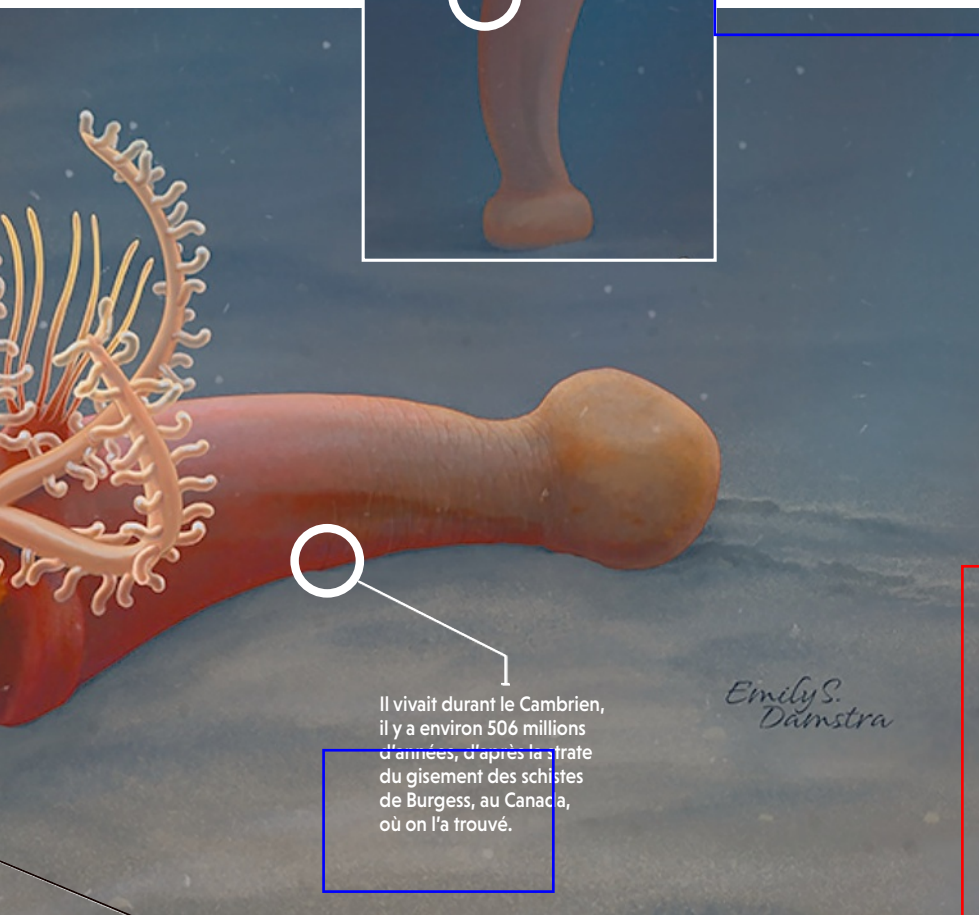
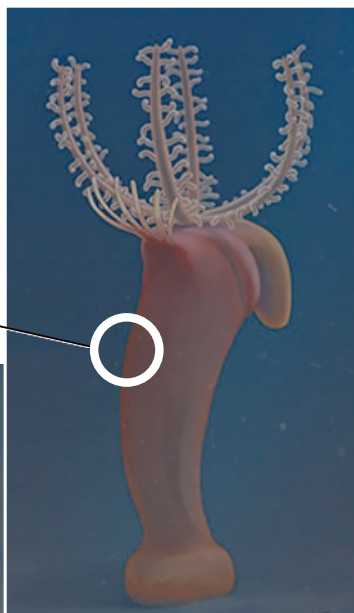
Bien curieux groupe en effet que celui des hémichordés! Sur nos côtes, on ne connaît que les entéropneustes, animaux libres, fouisseurs des sédiments marins. Mais dans les mers de l'hémisphère Sud, on rencontre les ptérobranches, organismes fixés, vivant en colonies dans des tubes qu'ils sécrètent et au sein desquels ils se rétractent. Les premiers sont dotés d'une trompe musculeuse – ou «proboscis» – qui, par contractions, leur permet de creuser des galeries dans le sable. Les seconds portent des bras munis de tentacules, confondus avec des branchies par les premiers zoologistes (d'où leur nom: branchie en forme d'aile). Ces bras, en nombre variable suivant les espèces, servent de système de filtration: ils

Cet animal marin de la taille d'une phalange arborait une couronne de bras de 1 centimètre de long munis de multiples tentacules qui lui permettaient de se nourrir en filtrant l'eau de mer.



Hervé Le Guyader  
a récemment publié:  
**Ma galerie  
de l'évolution**  
(Le Pommier, 2021).

L'animal avait sans doute la capacité à la fois de se déplacer (ci-dessous) et de se fixer au sol (ci-contre), et d'utiliser le mode de nutrition le plus approprié à la situation.



Il vivait durant le Cambrien, il y a environ 506 millions d'années, d'après la strate du gisement des schistes de Burgess, au Canada, où on l'a trouvé.

Sa trompe, ou proboscis (environ 0,7 centimètre de long), lui servait aussi à se nourrir en aspirant des particules organiques déposées sur le fond marin.



*Gyalsenglossus senis*  
Taille: entre 1,5 et 2 cm

## EN CHIFFRES

33

Ce ne sont pas 1, mais 33 spécimens de *Gyalsenglossus senis* qui ont été retrouvés parmi les fossiles des schistes de Burgess et ont servi à caractériser cette nouvelle espèce. Seul l'un d'eux, cependant, était complet.

50 000

Découvert au début du <sup>xx</sup>e siècle en Colombie-Britannique, le gisement de schistes de Burgess rassemble une extraordinaire diversité d'animaux et d'algues fossilisés remontant au Cambrien moyen, il y a environ 506 millions d'années. Les expéditions du Muséum royal de l'Ontario ont collecté plus de 50 000 spécimens.

120

Le taxon des hémichordés compte 120 espèces actuelles connues: 95 entéropeustes et 25 ptérobanches.

en position intermédiaire, le collier ou «mésosome» porte les bras des ptérobanches; et, à l'avant, une région nommée «prosoma» désigne la trompe des entéropeustes ou un bouclier céphalique chez les ptérobanches. C'est sur la foi de ces ressemblances que les zoologistes les ont réunis. Reste que les uns sont mobiles, les autres fixes; les uns dotés de tentacules, les autres non. Comment expliquer de telles différences entre des animaux d'un même taxon? Ou, en d'autres termes, comment était structuré leur ancêtre commun?

## LES HÉMICHORDÉS: DES GÉNOMES PAS SI INATTENDUS

Un siècle plus tard, les phylogénies moléculaires ont apporté plusieurs informations supplémentaires. Très vite, elles ont éloigné les hémichordés des chordés (dont font partie les vertébrés) pour les rapprocher des échinodermes (oursins, étoiles de mer, holothuries...). Puis, en 2014, Kenneth Halanych, de l'université d'Auburn, dans l'Alabama, et ses collègues ont utilisé la phylogénomique, c'est-à-dire une phylogénie à partir d'une grande partie des génomes, pour préciser la structure de l'arbre des hémichordés – et ont ainsi confirmé que ce taxon est partagé en deux groupes frères, les ptérobanches et les entéropeustes.

retiennent les proies planctoniques et les particules organiques en suspension qui sont ensuite ingérées.

À la fin du <sup>xix</sup>e siècle, cela n'a pas été facile pour les zoologistes – dont des grands, comme les Russes Alexander Kovalevsky et Ilya Metchnikov, le Suisse Louis Agassiz, ou le Britannique William Bateson (un des pères de la génétique moderne, alors tout jeune embryologiste) – de réunir des animaux si différents au sein d'un même embranchement. Certes, à la dissection, plusieurs caractères les rassemblent. Leur corps est divisé en trois parties: à l'arrière, le tronc ou «métasoma», la portion la plus longue, contient entre autres le tube digestif et les gonades;



L'année suivante, John Gerhart, de l'université de Californie à Berkeley, a réuni une équipe internationale pour analyser avec précision les génomes de plusieurs hémichordés et les comparer avec ceux de différents membres des échinodermes et des chordés. Résultat : l'équipe a montré une grande homogénéité, au sein du taxon qui rassemble ces trois branches (les deutérostomiens), dans l'organisation des gènes homologues le long du génome. En particulier, elle a mis en évidence l'existence, dans ce taxon, d'un complexe de quatre gènes régulateurs de la transcription de l'ADN et jouant un rôle déterminant dans le développement de branchies ou de structures similaires.

Cette découverte prouve que tous les deutérostomiens partagent de telles structures, et que l'absence de ce complexe dans certains groupes (dont les vertébrés amniotes, les tétrapodes qui, comme les humains, vivent leur développement embryonnaire dans un sac amniotique) correspond à une perte secondaire. Les ptérobranchés sont par ailleurs un de ces groupes, ce qui montre que leur plan d'organisation est considérablement différent de celui de leur ancêtre.

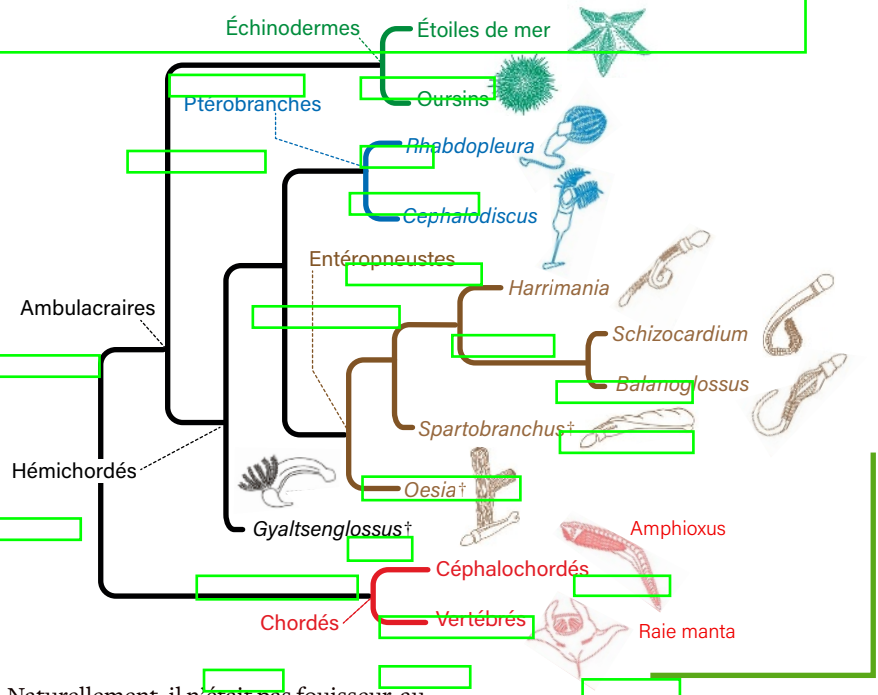
Tout cela était bien intéressant et plaiderait en faveur de la relation de parenté des ptérobranchés et des entéropeustes... Mais ne disait rien de la structure de l'ancêtre commun.

## UNE TROMPE ET UNE COURONNE DE BRAS

C'est alors qu'est entré en scène le minuscule fossile du Cambrien. En 2020, Jean-Bernard Caron, de l'université de Toronto, a décidé avec deux autres chercheurs de réexaminer des fossiles trouvés en 2010 par une équipe du Muséum royal de l'Ontario dans les schistes de Burgess, un gisement au sein du parc national Yoho, en Colombie-Britannique, réputé pour sa richesse et sa conservation. Baptisé *Gyaltsenglossus senis*, le petit animal pétrifié ressemble fort à un ptérobranche, étant donné les six bras en position supérieure, chacun portant une quinzaine de tentacules filtreurs. Mais, ô surprise, à la base de cette couronne de bras apparaît une trompe présentant une morphologie identique à celle des entéropeustes ! Les auteurs postulent une nutrition suivant deux modes : l'animal était filtreur par les tentacules, comme les ptérobranchés, et déposévore par le proboscis (il aspirait des particules organiques déposées sur le fond marin), comme les entéropeustes.

## UN PROCHE COUSIN DE L'ANCÊTRE COMMUN DES HÉMICHORDÉS

La comparaison de 113 caractères morphologiques du nouveau fossile *Gyaltsenglossus senis* avec ceux de 31 autres taxons du groupe des deutérostomiens (qui rassemble trois grandes familles, les chordés dont nous faisons partie, les échinodermes et les hémichordés) a permis d'y positionner le petit animal, ainsi que plusieurs autres fossiles des schistes de Burgess. Ainsi, *Oesia* est typiquement un entéropeuste qui, vraisemblablement, vivait dans des tubes verticaux et était suspensivore, comme les ptérobranchés. *Spartobranchus* ressemble beaucoup à *Harrimania*, et devait déjà creuser des galeries dans le sédiment. La situation phylogénétique de *G. senis*, proche de l'ancêtre commun des hémichordés, explique leur évolution simplificatrice. D'un côté, les ptérobranchés ont gardé les bras filtreurs ; de l'autre, les entéropeustes ont développé la trompe et sont devenus fouisseurs. Sans ce fossile, il était impossible de démontrer ce mécanisme.



Naturellement, il n'était pas fouisseur, au risque d'abîmer les tentacules.

La phylogénie fondée sur les caractères morphologiques place *Gyaltsenglossus senis* à la base de l'arbre des hémichordés, avant la séparation des ptérobranchés et des entéropeustes (voir l'encadré ci-dessus), ce qui laisse penser que l'ancêtre commun du taxon devait avoir une structure similaire à ce fossile. Ainsi la paléontologie amène la solution au problème posé : l'ancêtre avait deux modes de nutrition, et l'évolution s'est faite par spécialisation. Certains animaux, devenus exclusivement filtreurs, ont sécrété des tubes protecteurs. Étant fixés, ils ont réduit leur trompe en un bouclier céphalique. D'autres, devenus fouisseurs, ont abandonné leurs bras et hypertrophié le proboscis. La solution est donc élémentaire : le plan d'organisation ancestral était compliqué, puis a évolué vers la simplicité suivant deux chemins évolutifs différents. Mais comment le démontrer sans fossile ? ■

## BIBLIOGRAPHIE

- K. Nanglu et al., **Cambrian tentaculate worms and the origin of the hemichordate body plan**, *Curr. Biol.*, 2020.
- O. Simakov et al., **Hemichordate genomes and deuterostome origins**, *Nature*, 2015.
- J. T. Cannon et al., **Phylogenomic resolution of the hemichordate and echinoderm clade**, *Curr. Biol.*, 2014.

## OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À

Pour la  
Science

3 FORMULES  
AU CHOIXFORMULE  
PAPIERFORMULE  
PAPIER  
+ HORS-SÉRIEFORMULE  
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à [pouirlascience.fr](http://pouirlascience.fr)

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29 %

de réduction \*

31 %

de réduction \*

43 %

de réduction \*

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science - 235 avenue Le Jour se Lève - 92100 Boulogne Billancourt - email : [serviceclients@groupepourlascience.fr](mailto:serviceclients@groupepourlascience.fr)

PAG22STD



OUI, je m'abonne  
pour 1 an à [Pour la Science](http://pouirlascience.fr)

## 2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale) .....

@ .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

## 3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science en nous retournant ce bulletin d'abonnement complété

Pour un paiement par carte bancaire,  
rendez-vous sur [boutique.groupepourlascience.fr](http://boutique.groupepourlascience.fr)

## 1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE  
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€  
Au lieu de 82,80€

☐ FORMULE PAPIER  
+ HORS-SÉRIE

• 12 n° du magazine papier  
• 4 Hors-série papier

79€  
Au lieu de 114,40€

☐ FORMULE  
INTÉGRALE

• 12 n° du magazine  
(papier et numérique)  
• 4 Hors-série  
(papier et numérique)  
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€  
Au lieu de 174,40€

\* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques.  
Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement  
de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine  
uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site  
[boutique.groupepourlascience.fr](http://boutique.groupepourlascience.fr). Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter  
séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. 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, 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@pouirlascience.fr](mailto:protection-donnees@pouirlascience.fr).

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



L'AUTEUR

**HERVÉ THIS**physicochimiste, directeur  
du Centre international  
de gastronomie moléculaire  
AgroParisTech-Inra, à Paris

# LA GLACE À LA TRUFFE, PAS FACILE !

La cristallisation des glaces en chasse les composés odorants, qui s'évaporent. Ajoutons-les en fin de préparation.

Un ami cuisinier m'explique que son sorbet à la truffe, préparé le matin, n'a plus de goût le soir. Pourquoi ? Comment éviter cette perte de goût ? On répond à ces deux questions quand on comprend le phénomène de la cristallisation. Les chimistes apprennent à cristalliser dès le début de leurs études, et cela depuis la nuit des temps alchimiques. En ce bicentenaire de la naissance de Louis Pasteur, on n'oubliera pas que sa première découverte, fondée sur des cristallisations bien conduites, fut celle de formes différentes de l'acide tartrique. La production de gros monocristaux reste un problème actuel, puisque aujourd'hui les industriels en ont besoin pour fabriquer des diodes et d'autres systèmes microélectroniques, des panneaux photovoltaïques, etc.

Le monde de la production alimentaire n'est pas en reste : on cristallise le sel dans les marais salants, le sucre dans les usines qui l'extraient des betteraves, et la cryoconcentration des liquides, par élimination de glace, s'est imposée en cuisine avec des matériels introduits par la cuisine moléculaire.

Le principe ? Toujours le même : la formation d'un cristal, à partir d'un composé cristallisable dans un mélange, exclut les molécules ou ions de natures différentes de celles du composé qui cristallise. Par exemple, si l'on refroidit de l'eau salée au-dessous de la température de formation de la glace, les molécules d'eau s'empilent régulièrement, formant des cristaux dont sont exclus les ions chlorure ou sodium, de sorte que se forment progressivement un bloc de glace pure et une solution saline de plus en plus concentrée. Même idée pour le cidre, que

Cette boule de sorbet est coiffée d'une fine tranche de truffe, pour agréablement annoncer qu'elle est parfumée à la truffe !



les Canadiens mettent en hiver sur le rebord de la fenêtre : l'eau cristallise, excluant l'éthanol, qui reste dans la solution où apparaissent les glaçons ; si l'on retire ces derniers, on obtient une solution concentrée en éthanol, où subsistent les composés, qui donnent du goût.

Les chimistes qui apprennent à cristalliser savent que la patience est de règle pour qui veut obtenir de beaux cristaux. Pour ralentir l'évaporation du solvant, ils placent le récipient qui contient le mélange dans une enceinte fermée : le solvant qui s'évapore sature l'atmosphère au-dessus de la solution, ce qui ralentit l'évaporation.

En cuisine aussi, la patience est de règle lorsqu'on cristallise par évaporation : si l'on chauffe de l'eau pour y dissoudre du sel, puis que l'on évapore rapidement l'eau, une myriade de durs petits cristaux de sel se forment ; en revanche, quand on laisse la solution saline refroidir lentement, comme dans les marais salants, alors la cristallisation se fait en surface, engendrant des cristaux qui prennent la forme de précieuses plaquettes croustillantes (fleur de sel).

Revenons maintenant à la question posée par notre ami cuisinier. Lorsque l'on confectionne une glace ou un sorbet, le refroidissement conduit à la formation de cristaux (de glace et de matière

grasse), dont sont exclus les composés odorants, souvent peu solubles dans l'eau. Ces composés sont d'abord concentrés dans la solution où les cristaux sont suspendus, puis s'évaporent rapidement : le goût n'est plus là. ■



## UNE RECETTE DE GLACE À LA TRUFFE HACHÉE QUI GARDERA SON BON GOÛT

- 1 Faire bouillir un demi-litre de lait. Puis y mettre les grains noirs racés d'une gousse de vanille fendue en deux, ainsi que les deux moitiés de gousse racées ; couvrir jusqu'à complet refroidissement.
- 2 Dans une casserole, mettre cinq jaunes d'œufs et 80 grammes de sucre. Fouetter jusqu'à ce que le mélange blanchisse.
- 3 Retirer les deux demi-gosses du lait et verser ce dernier sur les jaunes sucrés.
- 4 Cuire en frottant bien le fond de la casserole jusqu'à épaississement.
- 5 Mettre cette crème anglaise dans une sorbetière, ou, sinon, au congélateur en mixant régulièrement pour éviter la formation de gros cristaux.
- 6 Juste avant de servir, ajouter de la truffe hachée ou un aromatisant truffe, éventuellement dilué dans de l'huile.

ABONNEZ-VOUS À

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE  
LIBRE

Pour la  
Science

3 FORMULES  
AU CHOIX

FORMULE  
PAPIER

FORMULE  
PAPIER  
+ HORS-SÉRIE

FORMULE  
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à [pouirlascience.fr](http://pouirlascience.fr)

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€  
PAR MOIS

6,50€  
PAR MOIS

8,20€  
PAR MOIS

29 %  
de réduction \*

31 %  
de réduction \*

43 %  
de réduction \*

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : [serviceclients@groupepourlascience.fr](mailto:serviceclients@groupepourlascience.fr)

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG22STD

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

☐ FORMULE  
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

4,90€  
PAR MOIS

-29 %

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE  
PAPIER +  
HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier  
• 4 Hors-série papier

6,50€  
PAR MOIS

-31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE  
INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)  
• 4 Hors-série (papier et numérique)  
• Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€  
PAR MOIS

-43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2/ Mes coordonnées

3/ Mandat de prélèvement SEPA

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ..... Ville : .....

Tél. : .....

Courriel : .....@.....  
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

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) : .....

IBAN : .....

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

**Établissement teneur du compte**

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal : ..... Ville : .....

**Date et signature**

**Organisme Créancier : Pour la Science**  
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris  
N° ICS FR92ZZZ426900  
N° de référence unique de mandat (RUM)

\* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site [boutique.groupepourlascience.fr](http://boutique.groupepourlascience.fr). Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.

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, 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@pouirlascience.fr](mailto:protection-donnees@pouirlascience.fr).

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

4/ **MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire



# A

## PICORER



Retrouvez tous  
nos articles sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

p.56

## 6,4 KILOHERTZ

C'est la fréquence à laquelle la sauterelle *Archaboilus musicus* émettait des sons il y a 165 millions d'années. Comme ses cousines actuelles, ce petit insecte produisait une stridulation en frottant des « râpes » situées sur ses ailes. Ces structures sont si bien conservées dans certains fossiles que l'on a reconstitué les sons émis : la fréquence correspond à environ un *sol* de la septième octave, note que seuls de rares chanteurs atteignent, comme Mariah Carey.

p.64

## ULTRASTABLE

En déposant lentement des molécules en phase gazeuse sur un substrat à certaines températures, on obtient des films vitreux dits « ultrastables », car analogues à de l'ambre : ils semblent le fruit d'un refroidissement de plusieurs millions d'années.

p.18

Plutôt que demander toujours plus aux terres, réparons-les d'abord en améliorant leur capacité de stockage de carbone organique dans les sols

CATHERINE AUBERTIN économiste de l'environnement à l'IRD

p.80

## PUIS2

Puis2 est le nombre obtenu en plaçant à la suite les chiffres de 2<sup>n</sup> après un zéro et la virgule, *n* étant un entier variant de zéro à l'infini :  $Puis2 = 0,1248163264128...$  Ce nombre est universel : il contient toute séquence finie possible de chiffres, même le récit de votre vie...

p.32

## 150 MILLIONS DE DEGRÉS

C'est la température requise pour produire la réaction de fusion nucléaire du deutérium et du tritium. En dessous, la vitesse des noyaux atomiques est trop faible pour qu'ils se rapprochent assez l'un de l'autre et fusionnent, car la répulsion coulombienne qui s'exerce entre eux du fait de leurs charges positives prend le dessus. Cette température équivaut à dix fois celle qui règne au cœur du Soleil !

p.92

## PTÉROBRANCHES

Ces petits animaux des mers de l'hémisphère Sud vivent fixés au sol, en colonies dans des tubes qu'ils sécrètent et où ils se rétractent. Ils se nourrissent à l'aide de bras munis de tentacules qui retiennent les particules organiques en suspension. Contrairement à ce que pensaient les premiers zoologistes, ces bras ne sont pas des « branchies en forme d'ailes ».

p.46

## 30 HEURES

À bord de la *Station spatiale internationale*, le temps maximal entre une décision d'évacuation en cas de symptôme menaçant et une admission en centre hospitalier est estimé à une trentaine d'heures. L'équipage à bord d'une station orbitale se trouve donc plus près d'un centre hospitalier moderne que certains navigateurs ou les scientifiques en hivernage en Antarctique.

En direct à l'auditorium  
En replay sur [cite-sciences.fr](http://cite-sciences.fr)  
Accès libre



## cycle De la vie sous nos pieds

En lien avec l'exposition *Banquet et la thema Nourritures*.

Le saviez-vous ? La quasi-totalité de notre alimentation dépend des sols. Explorez cette interconnexion symbiotique et découvrez des pistes de production éco-responsables.

**mardi 5 avril à 19h**

### La vie intraterrestre, rencontre dans les profondeurs

Environ 70% des microbes de la Terre vivent dans ses profondeurs, dans des roches autrefois considérées stériles mais où bactéries et autres micro-organismes abondent.

Avec **Bénédicte Menez**, géobiologiste à l'Institut de physique du globe de Paris.

**mardi 12 avril à 19h**

### Comment le sol façonne notre monde ?

Le sol fait aussi la fertilité des océans, régule le cours des rivières et modifie le climat. Urbanisation, agricultures inadaptées, pollution... contrecarrent cet équilibre et contribuent à sa disparition.

Avec **Marc-André Sélosse**, biologiste, professeur du Muséum national d'histoire naturelle.

**mardi 19 avril à 19h**

### Des SOL-utions, pour la sécurité alimentaire et le climat

Nos sols peuvent devenir des outils de développement durable, grâce à des pratiques agricoles permettant d'accroître les stocks de carbone ou *via* la réduction du travail du sol...

Avec **Claire Chenu**, directrice de recherche Inrae, professeure associée à AgroParisTech.



# INSOMNIE



L'insomnie est un trouble social. Elle touche les personnes en situation de mal logement, les familles que l'on expulse à répétition sans solutions alternatives, dont le sommeil est empreint de doutes, d'angoisses et dont la vie est faite d'errance.

**LE MONDE  
EST MALADE,  
A NOUS  
DE LE SOIGNER.**

Faites un don sur [medecinsdumonde.org](https://medecinsdumonde.org)