

SEP  
TOP  
ventes



# epsilon

nouveau magazine d'actualité scientifique

n°

22

avril  
2023

## ÉVÈNEMENT

LES PREMIERS  
TRADUCTEURS  
POUR ANIMAUX

## SAPIENS

TOUT EST  
DANS LE PIED !

## RÉCHAUFFEMENT

L'EFFET

PERVERS DE LA  
DÉPOLLUTION

## MISSION JUICE

EN ROUTE  
POUR LES LUNES  
DE JUPITER

## ÉCOLOGIE

LA SOLUTION  
BIOCHAR ?

# LA PHYSIQUE PASSE DU CÔTÉ OBSCUR

## ChatGPT

LE CONCEPT MATHÉMATIQUE DÉLIRANT  
QUI POURRAIT TOUT CHANGER

BELUX : 6,20 € - CH : 10 CHF - IT-ESP-PORT-CONT :  
6,30 € - DOM : 6,30 € - TOM : 6,30 XPF - TUN : 13 TND  
MAR : 67 MAD - CAN : 9,99 \$CAN - D : 8,90 € CPPAP

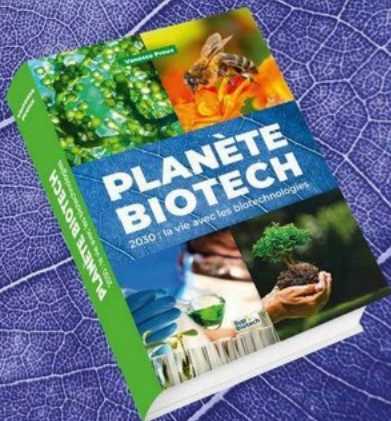
L 14100-22-F 5,90 € - RD



# L'ÉCOLE DES INGÉNIEUR·E·S EN BIOTECHNOLOGIES

À paraître le 4 avril 2023, ce deuxième ouvrage prospectif « 2030 : la vie avec les Biotechnologies » interroge sur la manière dont nous vivrons, nous nous nourrirons et nous nous soignerons dans le futur avec les biotechnologies.

Si vous souhaitez participer  
à la conférence de lancement,  
2030 : Les Biotechs vont-elles sauver la planète ?  
Rendez-vous mardi 28 mars. (Sur inscription)



Campus Lyon  
156 Rue Paul Bert 69003 Lyon • 04 84 34 02 85

Campus Paris - Villejuif  
66 rue Guy Môquet 94800 Villejuif • 01 84 07 19 16



[www.supbiotech.fr](http://www.supbiotech.fr)

Établissement d'enseignement supérieur privé. Cette école est membre de EFMD EQUIS

## Édito



**MATHILDE FONTEZ**  
RÉDACTRICE EN CHEF

« La physique passe du côté obscur »... Nul doute que vous avez saisi la subtile référence à *Star Wars* dans le titre de couverture de ce mois. Ce n'est pas qu'un clin d'œil journalistique : ce sont les physiciens eux-mêmes qui mobilisent l'imaginaire de la science-fiction. « Photon noir », « matière noire », « énergie sombre », « secteur sombre », voilà les mots qu'ils choisissent pour désigner les concepts qu'ils inventent.

Cela peut arriver aussi dans d'autres domaines – on pense au fameux organisme monocellulaire des sous-bois surnommé « blob », en référence à l'extraterrestre gluant du film éponyme. Mais force est de constater que c'est chez les physiciens que ces références SF sont les plus mar-

quantes, courantes, structurantes. Peut-être les spécialistes des particules et des astres sont-ils plus imprégnés d'une certaine pop culture. Ou peut-être, plutôt, ont-ils besoin plus que les autres de formuler des noms évocateurs pour donner corps à leur matière théorique. C'est un défi pour la physique plus que pour toute autre science : il faut

faire école, se rassembler autour d'une théorie pendant des années – des dizaines d'années parfois – avant qu'elle ne surgisse dans le réel, en étant tout à coup confirmée par l'expérience. Un nom puissant pour imposer un concept évanescant : voilà la méthode ! La pop culture est une ressource qui permet aux explorateurs de la matière d'habiter leurs mondes imaginaires.

# epsilon

## POP SCIENCE

ABONNEZ-VOUS À **epsilon** ET NE MANQUEZ AUCUN NUMÉRO [EPSILOON.COM](http://EPSILOON.COM)



POUR CE NUMÉRO, EPSILOON A INTERROGÉ

# 103 scientifiques

*dans le monde entier*

**« La dépollution est responsable de la moitié de l'accélération actuelle du réchauffement mondial »**

Stuart Jenkins,  
physicien de l'atmosphère  
(Royaume-Uni)

lire p. 72

**« On n'a jamais été aussi proche de pouvoir interpréter la communication des animaux »**

Olivier Adam,  
bioacousticien (Paris)

lire p. 60

**« Ce qu'on essaye de découvrir aujourd'hui, ce sont les conditions qui pourraient favoriser la vie sur les lunes glacées »**

Lorenzo Carré,  
exobiologiste (Toulouse)

lire p. 72

**« Ses propriétés rendent le pied humain unique parmi les primates »**

Gilles Berillon,  
paléanthropologue  
(Perpignan)

lire p. 68



**« Les topos de Grothendieck pourraient aider l'IA à accéder au sens »**

Jean-Claude Belfiore,  
Ingénieur informaticien  
(Paris)

lire p. 80

**« La première fois que j'ai entendu parler du biochar, j'ai eu le sentiment que c'était trop beau pour être vrai »**

Annette Cowie,  
agronome (Australie)

lire p. 56

**« Le secteur sombre pourrait être une porte vers un tout nouveau champ de la physique, inconnu jusqu' alors »**

Joachim Kopp,  
physicien (Suisse)

lire p. 40



• (voir la liste complète des scientifiques p. 98) •



# cité

sciences  
et industrie



# cancers

exposition  
6 septembre 2022  
— 6 août 2023



# Club epsiloon

Dans le numéro de décembre (oui je rattrape mon retard), vous indiquiez onze sites en compétition pour symboliser l'entrée dans l'anthropocène : est-ce qu'on pourra connaître le vainqueur et pourquoi il l'a emporté ?

Thomas Meyer, Metz

Vous faites bien de le demander : un dernier tour de vote doit encore départager le lac canadien et le cratère chinois. Le résultat sera révélé le 19 avril. Nous vous en parlerons dans un prochain « Fil d'actus ».

*Votre article sur les jeux vidéo m'a fait beaucoup de bien ! Mon fils a fait une phobie scolaire en classe de 4<sup>e</sup> et il était tout le temps sur les jeux vidéo. Que n'ai-je pas entendu là-dessus ? Comme quoi c'était la cause de tous les maux, que je devais l'empêcher de jouer... Mais moi, je voyais bien que ça lui faisait du bien, je voyais que ce qu'il faisait sur Minecraft, par exemple, c'était génial ! Votre article a confirmé mon intuition...*

Cécile T., Paris

Dans votre article sur *Homo fictionus* [#20, p. 42], le linguiste Bernard Victorri attribue la disparition de Neandertal au fait qu'il ne disposait pas de mythes, qu'il ne savait pas se raconter des histoires au contraire des humains... Supposition pour le moins hasardeuse. À mon tour d'en faire une : et si les humains étaient les responsables de la disparition de Neandertal pour obéir à un mythe faisant de cet étrange étranger une brute qu'il fallait détruire ? Car les mythes peuvent être utilisés pour le meilleur ou pour le pire.

Robert Tanguy, Brest

Les chercheurs n'ont pas décelé dans les mythes de *Sapiens* de trace de cet « étrange étranger ». Et les mythes de Neandertal restent insondables. Mais vous n'avez pas tort : tout cela reste spéculatif.



Une question sur nos articles ? Une remarque ? Écrivez-nous à [epsiloon@uniqueheritage.fr](mailto:epsiloon@uniqueheritage.fr)

**Abonné depuis le début de la revue, il ne me semblait pas y lire l'horrible expression « en fait ». Mais depuis trois numéros, c'est un festival. En titre et même aujourd'hui en couverture ! Pitié, c'est déjà mauvais à l'oral, mais à lire j'en peux plus. À part ça, je me régale.**

Dominique Farque, Épinal

**Pourquoi les animaux jouent-ils, demandez-vous [#20, p. 66] ? Vous avez la réponse dans la rubrique « Pop Science » : « La créativité, c'est l'intelligence qui s'amuse ».**

W00P, Berne, Suisse

**Je réagis à la réaction d'Alexandra Demeure, une petite jeune probablement, au sujet de l'article « Vieillir, ça a du bon ! » [#21, p. 6]. J'ai maintenant 75 ans et je me suis retrouvé dans ce mélange de « tête ailleurs » et de concentration. Autant je m'éparpille facilement lorsque je ne fais pas des choses importantes (« où j'ai bien pu fourrer ce #=,!!#? de tournevis »), autant la concentration devient intense pour des choses qui concernent la famille, la santé, ou pour discuter un titre d'*Epsiloon* dans lequel, à mon avis, il manque un point d'interrogation... Salutations enthousiastes.**

Philippe Blanchis, Bullion

*« Les ingénieurs ont tendance à considérer le grand public comme irrationnel et trop émotif... mais on peut s'interroger aussi sur la rationalité des estimations statistiques des ingénieurs »,* témoigne un chercheur dans votre dossier spécial nucléaire [#18, p. 51]. Pour une revue scientifique, je trouve dangereux de placer sur un même plan le débat sociétal très passionné et le débat plus scientifique au sein de la communauté. Cela laisse entendre que tous les avis se valent, une position plus que dangereuse, qui provoque une vraie défiance vis-à-vis de la science... et que vous ne souhaitez pas j'imagine.

Ludovic Liberpré, Dole

Vous avez raison, bien sûr. Reste que c'est ici un scientifique qui s'exprime. Ce qui souligne la spécificité des calculs du risque nucléaire.

## Rectificatif

Dans notre article sur les vides cosmiques du mois dernier, en légende du graphe montrant les 7 grands vides aux alentours, nous nous sommes pris les pieds dans les zéros : les distances sont comptées en milliers d'années-lumière, et non en milliards. Et sinon, la voiture électrique la Jammais contente de 1899 n'était pas française, comme mentionné dans notre hors-série #3, p. 22, mais belge. « Il serait temps que la France cesse de s'approprier des exploits réalisés dans d'autres pays », nous tance légitimement Claude Rowies, depuis Bruxelles.



**epsiloon**  
nouveau magazine d'actualité scientifique

**Abonnez-vous...**

Le mensuel + le hors-série



**82€ / AN**  
Sans engagement\*  
LA VERSION NUMÉRIQUE EST OFFERTE

OU

Le mensuel



**59€ / AN**  
Sans engagement\*  
LA VERSION NUMÉRIQUE EST OFFERTE

... et complétez  
*votre collection*



\* Voir conditions générales de vente sur epsiloon.com. Offre d'abonnement valable uniquement en France métropolitaine. Photos non contractuelles.



**SUR EPSILOON.COM**  
ou scannez le QR code ci-dessus



par téléphone  
**01 87 64 09 62**  
Du lundi au vendredi de 9 h à 19 h



**SUR COLLECTION.EPSILOON.COM**  
ou scannez le QR code ci-dessus



Suivez-nous aussi  
*sur les réseaux sociaux*



Biochar **56**



**40** Secteur sombre



Lune glacée **72**



**60** Google Translate des animaux

## epsilon

Pour écrire à la rédaction : [epsilon@uniqueheritage.fr](mailto:epsilon@uniqueheritage.fr)

### La rédaction

Yvonne Diraison, Mathilde Fontez, Vincent Nouyrigat, Hervé Poirier (rédaction en chef), Muriel Valin (éd-jointe), Pierre-Yves Bocquet, Fiorenza Gracci, Valérie Grefroz, Roman Ikonkoff, Alexandra Pihan, Jean-Baptiste Voytieras (rédaction), Anne Riera (édition), Léa Desrayaud (infographie)

**Avec :** Stéphane Aubin (icono), Héléne Colau, Bruno Levesque (édition), Valérie Samuel (maquette), Tâouan Corlet, Pierre Henriquet, Héroïse Rambert, Émilie Rauscher (rédaction)

### SERVICE CLIENT et ABONNEMENT

**+33 (0)1 87 64 09 62**

Appelez-nous pour vous abonner ou pour toute réclamation/modification

**Mail :** [abo.epsilon@uniqueheritage.fr](mailto:abo.epsilon@uniqueheritage.fr)

**Courrier :** Vivatic - Epsilon - 127 rue Charles-Tillon - CS 80021 93308 Aubervilliers Cedex

**Toutes nos offres :** boutique.epsilon.com

Abonnement annuel : 59 € (12 n°) ou 32 € (12 n° - 4 hors-séries)

**Ventes au numéro (réservé dépositaires et marchands de journaux) :** Isabelle Alliaume, diffusionmdj@uniqueheritage.fr (+33) 01 56 79 36 94. Distribution : MLP

**Abonnements :** Nathalie Ounnas, Vanessa Gressier (relations abonnés)

**Publicité :** La Compagnie Media: virginie.hoang@lacompagniemedia.fr, 06 61 11 51 63 - Martina Berla, 06 07 57 17 08 - Marine Weiss, marine@vroum-pp.fr, 06 08 96 82 49  
Fabrication: Créatoprint, 06 71 72 43 16

Impression: Imaye (53)  
Origine du papier: Finlande  
Taux de fibres recyclées: 0%  
Certification: PEFC

Prot.: 0,002 kg/t



Epsilon est édité par It Is Not Rocket Science, SAS, 141, Bd. Ney, 75018 Paris

**Actionnaire :** Unique Heritage Media  
**Président et directeur de la publication :** Emmanuel Mounier  
N° ISSN : 2800-4736  
Commission paritaire : 0723K94627  
Dépôt légal : à parution

Une publication du groupe



**Crédits photo :** Couverture: Shutterstock - p.12-13: J. M. Madrido/IAA-CSIC - Cicero Moraes - Shutterstock - C. Salzman; p. 14-15: Shutterstock; p.16-17: Cooper Downes, Predictive Science/Inc. L. P. Chikta et al. Nature Astronomy - p. 18-19: Kai Zhou - B. Stafford/Nasa - Didier Cotu/Martin Drobnik/ IEM/ CNRS  
**Photoblogique :** p.20-21: David Matland - Jérôme Riedl/Univ. de Lille

GETTY IMAGES - INSAJAP - GETTY IMAGES - SHUTTERSTOCK

**12**

FIL D'ACTUS

**16**

EN IMAGES

**22**

### L'ENQUÊTE

RÉCHAUFFEMENT :  
LE PIÈGE DE LA  
DÉPOLLUTION

**30**

LABYRINTHE  
Le casse-tête de la pilule

**32**

CONTRE-PIED  
"Le talent n'existe pas"

**34**

ATLAS  
L'impact de la production  
alimentaire

**36**

C'EST DANS L'AIR  
Quand les ballons espionnent

**38**

BIG DATA  
Chaque langue  
s'adapte aux bébés

**40**

LE DOSSIER  
LA PHYSIQUE PASSE  
DU CÔTÉ OBSCUR

Bienvenue dans  
le secteur sombre

**56**

ÉCOLOGIE  
La solution biochar

**60**

IA  
Le Google Translate  
des animaux

**68**

SAPIENS  
Tout est dans le pied

**72**

VIE EXTRATERRESTRE  
En route vers  
les lunes glacées

**80**

TOPOS  
Les maths au secours de  
l'intelligence artificielle



## POP, SCIENCE

**85**

FUN FACTS  
Ratons laveurs, sons graves,  
Mayas, trous de vers, coqs,  
Neandertal, manchot géant,  
yétis, avalanche sous-marine...

**88**

CULTURE SCIENCE  
Exposition « Ramsès II »,  
une exploration de la légende

**90**

PROJETS X  
Des hameaux qui jaillissent en  
boules ; une base sous-lunaire qui  
gonfle au soleil ; l'autobus qui  
copie le train

**94**

INSTANT GEEK  
Bureau, roue, télescope  
et montre.

**96**

LIFE  
Menteurs mais polis, froid dange-  
reux, timidité bien surmontée, déca  
placebo, trompeuses images...

epsilon &  
franceinfo:  
S'ASSOCIENT

RETROUVEZ LE BILLET SCIENCES  
CHAQUE WEEK-END,  
À 7H21 ET 9H21



## Les paranthropes aussi taillaient des outils

Ce sont pourtant de très lointains cousins, même pas du genre *Homo*, qui vivaient il y a près de 3 millions d'années en Afrique. Des restes de cette espèce viennent d'être découverts au Kenya, associés à toute une panoplie d'outils sophistiqués en pierre – percuteurs et objets tranchants. Qu'ils ne se sont pas privés d'utiliser : les squelettes d'hippopotames retrouvés sur le site présentent de nettes traces d'entailles.

## Même endormis, les volcans influencent le climat

En cause, leurs dégazages passifs qui génèrent trois fois plus de particules sulfatées dans l'atmosphère que ce que prévoient les modèles. De quoi revoir la balance entre les émissions anthropiques et celles naturelles de ces aérosols refroidissants.

## Léonard de Vinci avait compris la gravité avant tout le monde

On croyait tout savoir de ce génie, mais l'analyse de son *Codex Arundel* nous surprend encore. Léonard y compare le mouvement horizontal accéléré d'un bocal et celui du sable qui en tombe. Certes, son calcul est approximatif, mais cette « équivalence des mouvements » est visionnaire. Il faudra attendre plus de 400 ans pour qu'Einstein aille au bout de ce lien entre gravité et accélération dans la théorie de la relativité.



## Voici comment naissent les fleurs

Tout se noue entre deux protéines, et c'est seulement une fois qu'elles sont unies qu'elles peuvent activer les gènes essentiels à la floraison. « Grâce à la cryomicroscopie électronique, on a même vu en 3D comment elles se collent l'une à l'autre », s'émerveille le botaniste François Parcy, qui a mené l'étude. C'est vrai pour le géranium, le riz, la tomate, toutes les plantes à fleurs, ainsi que leur ancêtre : la rencontre entre ces deux protéines a changé la face du monde. Ou en tout cas, sa couleur.

## Un troisième patient hérité du sida

Plus de trace du virus chez le « patient de Düsseldorf ». Cet homme de 53 ans bénéficie d'une rémission complète après une greffe de moelle osseuse composée de cellules souches résistantes au VIH, issues d'un donneur porteur d'une rare mutation du gène CCR5. Un traitement très spécial, il faut dire.

## Non, les arbres ne communiquent pas

L'idée était si belle... Mais en relisant les études sur le fabuleux réseau d'échanges tissés entre leurs racines par les champignons mycorhiziens, trois biologistes concluent qu'aucune preuve sérieuse n'atteste qu'il favorise l'entraide entre les arbres, ni qu'il leur permet de véhiculer des signaux d'alerte. Et il est loin de se déployer partout.

## Il y aurait encore un autre type d'anneaux dans le Système solaire

Il a été détecté autour du corps céleste Quaoar, situé au-delà de Neptune. « Le fait vraiment inédit, c'est la position très éloignée de l'anneau par rapport à son astre, à 4000 km de distance », précise Bruno Morgado, à l'origine de la découverte.



## Ils ont créé une autre forme de glace

La recette concoctée par des chercheurs britanniques paraît assez simple : placez dans un saladier porté à  $-200^{\circ}\text{C}$  de grosses billes d'acier et de la glace ordinaire, puis malaxez très vite. Il en ressort une forme de glace inédite, dont la densité et l'arrangement moléculaire sont étonnamment proches de ceux de l'eau liquide. Les physiciens en sont tout chamboulés : et si c'était une forme vitreuse de l'eau, une sorte de verre d'eau ? Ou alors un état « cristallin fortement cisailé », qui pourrait même être une clé de la tectonique des lunes glacées du Système solaire. Mystérieuse  $\text{H}_2\text{O}$ ...

## Les mères orques se sacrifient pour leur fils

C'est ce que révèlent quarante ans de suivi d'une population du Pacifique Nord : tout le soin pris par les mères à s'occuper de leurs petits mâles réduit d'environ 50% leur succès de reproduction. Et ce coût ne s'atténue pas à mesure que les fils vieillissent. Leur charge mentale dure toute leur vie.



**Le chacal débarque en Bretagne**

La photo du canidé prise dans le Sud-Finistère a été certifiée par des spécialistes. Depuis 2017, plusieurs spécimens venant du sud-est de l'Europe ont été observés dans l'Hexagone. Eux, au moins, ne s'attaquent pas aux troupeaux...

**Notre Galaxie crée plus d'étoiles que prévu**

Des astrophysiciens allemands évaluent le rythme annuel de production de la Voie lactée à l'équivalent de 4 à 8 fois la masse du Soleil — soit 2 à 4 fois plus que ce qu'annonçaient de précédents modèles. C'est l'isotope aluminium-36 qui trahit la naissance de ces étoiles.

**Enfin un traitement préventif contre la bronchiolite**

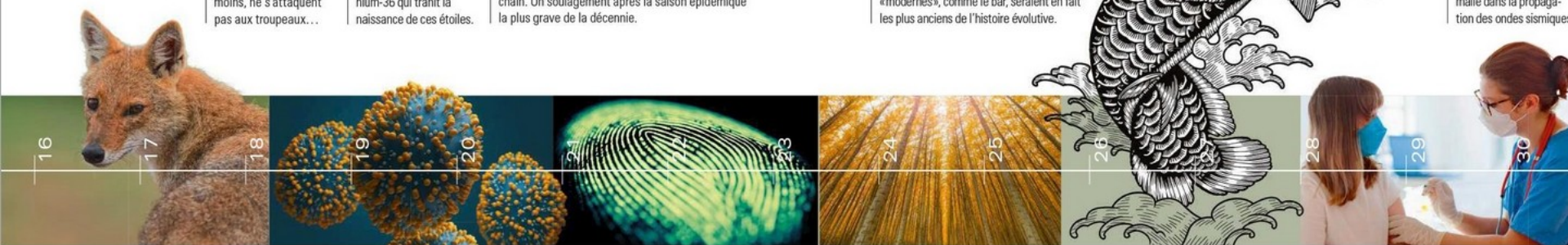
Il s'agit d'un anticorps monoclonal qui opère comme un vaccin : une simple injection réduit de 79,5% le risque de tomber malade et prévient les hospitalisations des bébés touchés par cette infection des bronches. L'Europe a accéléré la procédure de mise sur le marché de ce traitement, le nirsevimab, qui pourrait être autorisé en France avant l'hiver prochain. Un soulagement après la saison épidémique la plus grave de la décennie.

**Et si on avait trouvé les ancêtres des poissons**

Disons que les dernières analyses sont en train de mettre fin à la controverse qui déchire anatomistes et généticiens depuis un bon demi-siècle. Ceux qui se fondent sur l'anatomie parient sur le groupe des *Osteoglossomorpha*, celui des poissons éléphants; et ceux qui s'appuient sur des résultats génétiques penchent plutôt pour les anguilles. Or, une équipe française annonce maintenant que ces deux groupes n'en forment qu'un... Mieux : les poissons dits « modernes », comme le bar, seraient en fait les plus anciens de l'histoire évolutive.

**La Terre a une nouvelle couche géologique**

Constituée de roches partiellement fondues, elle se cache à 150 km sous nos pieds, au cœur de la partie molle du manteau. Des géophysiciens américains l'ont repérée grâce à une anomalie dans la propagation des ondes sismiques.



**L'OMS abandonne les recherches sur l'origine du Covid**

Difficile d'aller plus loin, faute de coopération des autorités chinoises : l'enquête du panel international d'experts va s'arrêter là. Si des études universitaires publiées en 2022 ont resserré l'état autour du marché de Wuhan, « les preuves solides font toujours défaut », déplore Jeffrey Sachs, de l'université Columbia. Mais les États-Unis poursuivent les recherches : une commission d'enquête sénatoriale est ouverte depuis le 1<sup>er</sup> février. Et la thèse de la fuite de laboratoire est désormais avancée par plusieurs organismes officiels comme le FBI... sans apporter d'éléments probants pour l'instant. C'est sans fin.

**Un tunnel entre l'Espagne et le Maroc**

Ah ! prendre le train pour l'Afrique... Ce projet titanesque en discussion depuis 1979 pourrait finalement se concrétiser : un ouvrage de 38,5 km de long creusé à 475 m de profondeur au niveau du détroit de Gibraltar, qui ressortirait vers Tanger. Reste à affronter les sols argileux instables de la région.

**Nos empreintes digitales sont des poils avortés**

Lors de leur formation, la protéine à l'origine des cellules pileuses s'active bien, mais elle est contrée par une autre protéine. De quoi engendrer un mécanisme de réaction-diffusion dessinant les vagues de crêtes successives si emblématiques de nos dernières phalanges.

**Une start-up annonce planter les premiers arbres OGM**

Il s'agit de peupliers dont la vitesse de croissance aurait été boostée de 53%. Objectif de la firme Living Carbon : pomper un maximum de CO<sub>2</sub>. Aucune étude n'atteste pour l'instant de ces performances et le concept de forêt OGM pose d'immenses questions. Mais des premières graines viennent d'être semées aux États-Unis.

**La France se prépare à 4°C en plus**

C'est en tout cas l'hypothèse de réchauffement désormais envisagée par le gouvernement pour 2100, dans le cadre de son plan d'adaptation au changement climatique; contre +1,7°C actuellement. Un signe de plus s'il en fallait, quand on voit le déficit record de précipitations cet hiver.

**Lancement d'une campagne de vaccin contre les papillomavirus**

Elle sera gratuite et proposée dès la rentrée prochaine dans les collèges aux élèves de 5<sup>e</sup> volontaires, avec deux injections. Contractées lors des relations sexuelles, la plupart des infections sont bénignes. Mais elles sont chaque année responsables de plus de 6000 cas de cancers (col de l'utérus, ORL, pénis...) qui pourraient être évités par le dépistage et la vaccination. Actuellement, le taux de couverture en France est de 37% chez les filles et de 9% chez les garçons. Peut vraiment mieux faire...

**Découverte d'un cratère de météorite géant**

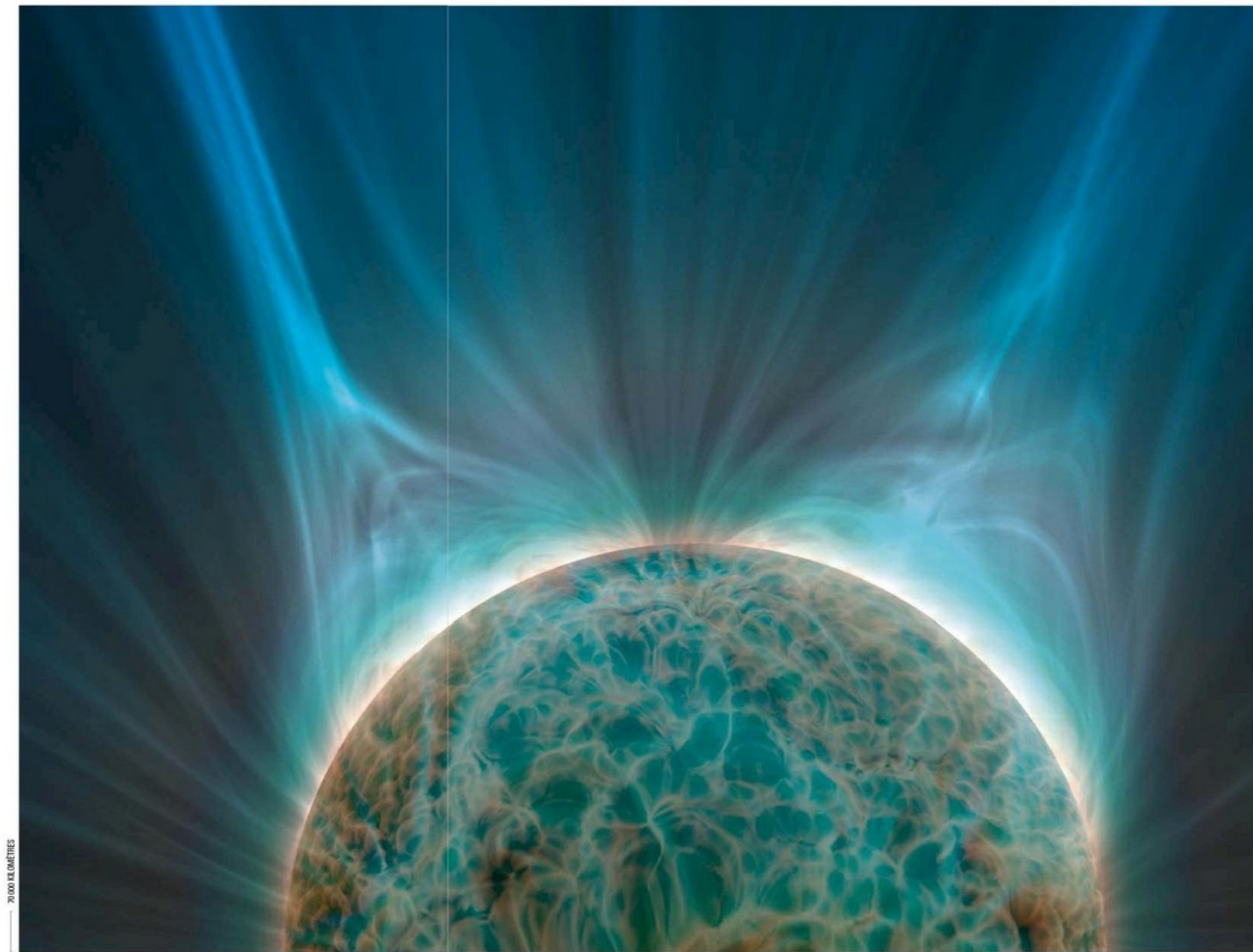
Ce vestige d'impact de 200 m de diamètre vient d'être authentifié dans le « domaine du météore », un vignoble du sud de la France — il y avait donc déjà des soupçons. En Europe, il n'existe que trois autres cratères de cette envergure, dont un en France, à Rochecouart. Cocrico.

Retrouvez toutes nos sources sur [epsilon.com/sources](https://epsilon.com/sources)



## Souffle solaire

« Cette simulation révèle le squelette magnétique de la couronne solaire », se réjouit Pradeep Chitta, physicien à l'Institut Max-Planck, à Göttingen. Pour ce faire, 4 200 microprocesseurs du supercalculateur Pleiades, de la Nasa, ont œuvré pendant soixante heures. Résultat : la toute première vision détaillée du vent solaire (en bleu), émergeant des arcs magnétiques de notre étoile (en blanc). Un intense flux d'électrons et de protons libérés dans l'espace à plus de 1 million de km/h. v.o.



## En images



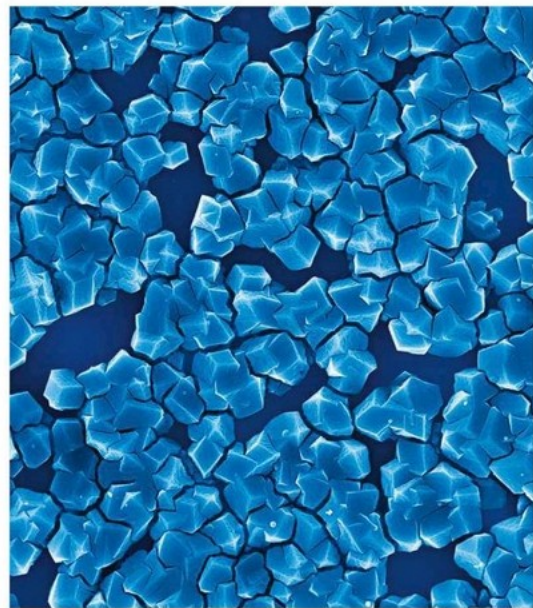
0,5 CENTIMÈTRE

### Mortelle couvée

La photographe Kat Zhou a dû plonger à cinq reprises pour saisir, au zoom, cette pieuvre de récif caraïbe couvant sa portée au creux d'un tube, au large de West Palm Beach, en Floride. « C'était un sentiment doux-amer de la voir protéger ses œufs pendant huit semaines sachant que sa fin était proche... » Car les pieuvres meurent systématiquement après l'éclosion de leur progéniture. **A.P.**

### Moonwalk

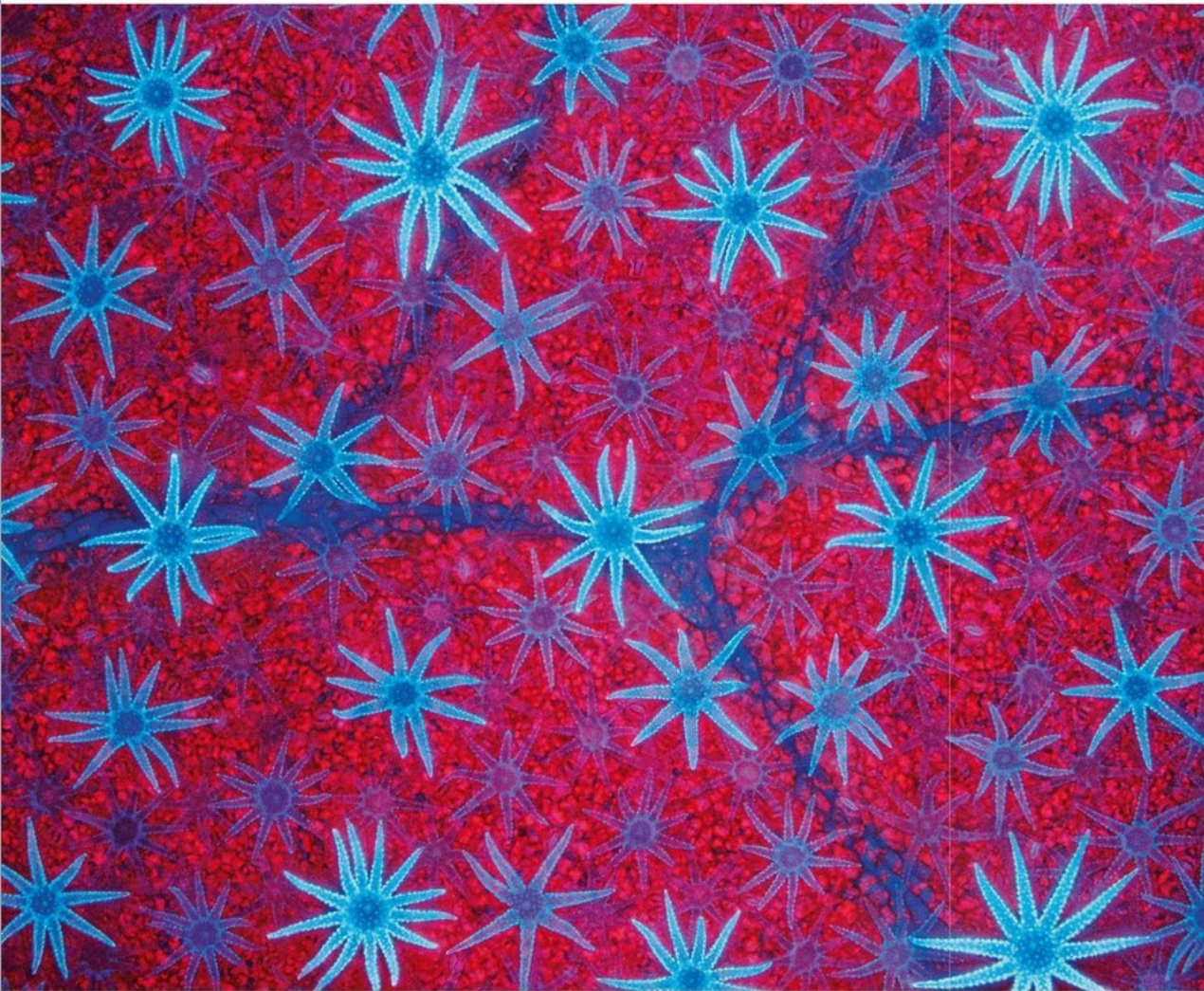
Environnement hostile, mobilité limitée par la combinaison, éclairage mimant celui de la Lune... Le 5 octobre dernier, deux membres de la Nasa ont collecté des échantillons dans un cratère désertique de l'Arizona. Objectif : se préparer à un futur voyage sur le pôle Sud lunaire, prévu en 2025 dans le cadre de la mission Artemis III. Pendant ce temps, à Houston, une équipe de contrôle restait en lien permanent avec eux pour simuler l'aide à distance et la récupération de photos en wifi... **M.V.**



### Meccano organique

Ça ressemble à des glaçons, mais ce sont des cristaux métallo-organiques en train de s'assembler pour former une membrane à l'échelle moléculaire. « Nous avons capté sous un microscope électronique à balayage l'étape durant laquelle ils sont encore en train de s'agencer les uns avec les autres », s'enthousiasme Martin Drobek, chimiste au CNRS. Ces matériaux nanostructurés formeront à la fin une couche compacte et continue qui servira à filtrer l'hydrogène, le CO<sub>2</sub> ou le méthane, par exemple. **M.V.**





## Heureux hasard

Normalement, la polarisation induite par la réflexion du soleil à la surface de l'océan est invisible à l'œil nu. Seuls des capteurs optiques dédiés peuvent mettre en valeur ce spectre coloré... ou le hublot d'un Boeing 787 ! «*La dernière génération de hublots "smart glass" conçus pour fournir une opacité réglable offre au passager attentif et chanceux l'occasion unique d'admirer ce spectacle irisé*», se réjouit le physicien Jérôme Riedi, auteur du cliché. **A.P.**

## Bouclier magique

Non, rien à voir avec des étoiles de mer... Le microscope de David Maitland révèle ici les toutes petites touffes de poils qui couvrent une feuille de *Deutzia scabra*, une plante ornementale originaire du Japon. «*Ils la protègent de la déshydratation et sans doute aussi des insectes prédateurs*», commente le zoologue et photographe, qui a éclairé la feuille sous une lumière ultraviolette pour révéler sa fluorescence bleue et rouge. **v.g.**

Retrouvez toutes nos sources sur [epsilonon.com/sources](https://epsilonon.com/sources)



L'enquête

# RÉCHAUFFEMENT LE PIÈGE DE LA DÉPOLLUTION

C'est un impensé des politiques climatiques. Et pourtant, les experts sont formels : la lutte contre la pollution, autrement dit la disparition de la couverture d'aérosols qui réfléchit la lumière solaire vers le ciel, aggrave le réchauffement. De combien exactement ? +0,5°C ? +1°C ? C'est la grande incertitude...

PAR VINCENT NOUYRIGAT

**« La dépollution est responsable de la moitié de l'accélération actuelle du taux de réchauffement mondial »**

Stuart Jenkins, physicien de l'atmosphère à l'université d'Oxford

**« Les aérosols ont aussi un impact sur la circulation atmosphérique, les vents, le jet-stream, les moussons... »**

Robert Allen, climatologue à l'université de Californie

**« Les pays ne font pas d'inventaire détaillé des différentes espèces d'aérosols qu'ils émettent »**

Duncan Watson-Parris, spécialiste des nuages à l'université d'Oxford

GETTY IMAGES



## LES CLIMATOLOGUES COMMENCENT À LE MESURER, LA DÉPOLLUTION ACCÉLÈRE LE RÉCHAUFFEMENT

À première vue, cela ressemble à une excellente nouvelle: plusieurs études viennent de confirmer une forte baisse ces dernières décennies de la pollution atmosphérique dans de nombreuses régions du monde, y compris en Chine. Une tendance salubre quand on sait que la mauvaise qualité de l'air extérieur provoque chaque année plus de 4 millions de décès prématurés sur la planète. Franchement, difficile de ne pas s'en réjouir... Pourtant, cette heureuse perspective soulève un certain malaise chez les climatologues. «*Oui, ça crée une sorte de conflit avec le climat*», reconnaît du bout des lèvres Annica Ekman, météorologue à l'université de Stockholm.

En effet: d'autres résultats, cette fois-ci bien peu réjouissants, sont en train de tomber. Des résultats liés à cette dépollution en cours, plus précisément à la disparition progressive de toutes les minuscules particules sulfatées générées par nos moteurs

à combustion. Quoique très nocives, elles avaient au moins la vertu de réfléchir une partie du rayonnement solaire vers l'espace, tel un parasol apaisant la surchauffe de notre atmosphère dopée par l'effet de serre. Un atout fraîcheur qui nous manque désormais...

### GRAND NETTOYAGE

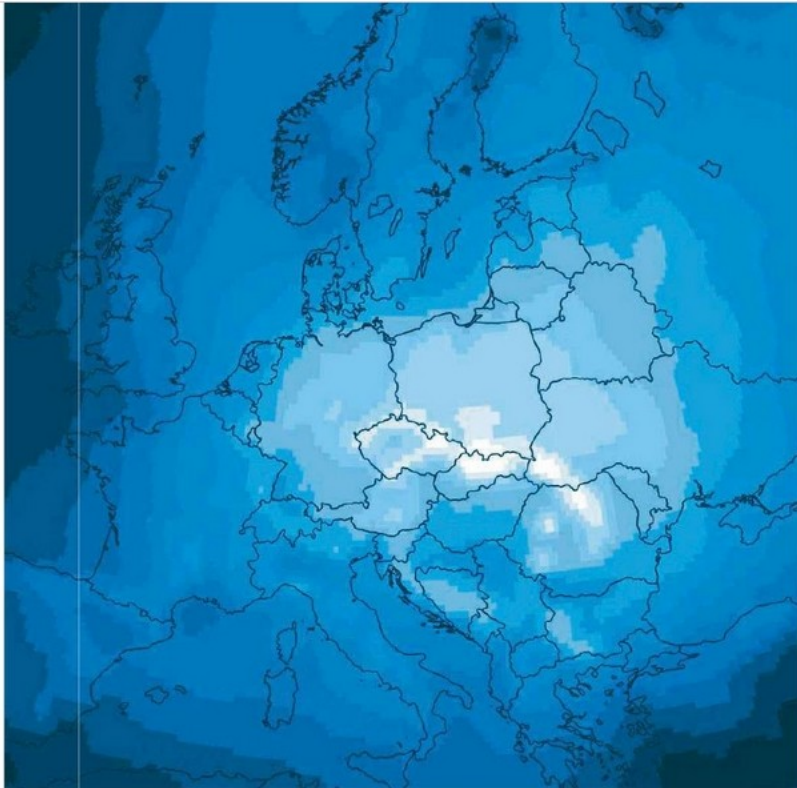
«*Notre dernière analyse montre que la diminution des aérosols dans le monde depuis l'an 2000 a provoqué entre 15 et 50% de l'effet réchauffant des émissions de CO<sub>2</sub> durant cette période*», signale Johannes Quaa, à l'université de Leipzig. Qui n'est pas le seul à remarquer un effet substantiel: «*Les calculs que nous venons d'effectuer indiquent que le retrait des particules est responsable de la moitié de l'accélération actuelle du taux de réchauffement mondial*», évoque Stuart Jenkins, physicien de l'atmosphère à l'université d'Oxford. Plus concrètement, une étude publiée cet automne a relevé une augmentation d'environ 1°C des températures estivales en Europe centrale depuis 1980 sous le seul effet de la diminution de la pollution –soit autant que sous l'impulsion de la hausse des gaz à effet de serre.

«*Vrai dire, les experts ne sont pas surpris. «Le rôle important que peuvent jouer les aérosols sur le climat est très étudié et largement accepté par la communauté scientifique*», indique Pascal Polonik, chercheur à l'Institut d'océanographie Scripps. Mais fort peu de chercheurs en parlaient jusqu'ici

Sans l'effet de parasol fourni par les aérosols de pollution, la surface des continents et des océans se réchauffe plus vite. Ce violent regain de température est même, par endroits, comparable à celui induit par l'augmentation des gaz à effet de serre. C'est ce qu'a révélé par exemple, cet automne, une équipe de l'université de Stockholm pour le continent Européen.



ouvertement auprès des décideurs politiques ou du grand public... «*C'est en train de changer avec le constat de la dépollution*», remarque Stuart Jenkins. D'autant plus que la tendance est amenée à s'accroître avec la perspective de l'abandon des énergies fossiles. Si le grand nettoyage de l'atmosphère est déjà largement accompli en Europe et aux États-Unis, à coups de filtres installés sur les centrales à charbon et dans les transports, une partie de l'Afrique et de l'Asie sont encore sous une chape de particules: «*Les concentrations actuelles en Inde*



et dans l'est de la Chine restent plus élevées qu'elles ne l'étaient en Europe dans les années 1975-1980», relève Paul Glantz, de l'université de Stockholm.

### EFFET NUAGES

Débarrasser le ciel de cette pollution mortifère risque encore d'aggraver le réchauffement dans les décennies à venir. De combien? C'est la grande question du moment. Le dernier rapport du GIEC table sur environ 0,5°C à l'échelle mondiale. Mais les incertitudes sont énormes. «*Les résultats des différents*

modèles varient d'un facteur 5, c'est l'une des principales sources d'incertitude pour le climat futur», souligne Robert Allen, climatologue à l'université de Californie. «*L'impact des gaz à effet de serre est beaucoup plus facile à déterminer que celui des aérosols*», confie Olivier Boucher, modélisateur à l'Institut Pierre-Simon Laplace, à Guyancourt.

Il faut dire qu'à la différence des très classiques molécules de CO<sub>2</sub>, ces particules varient énormément en termes de taille, forme ou composition chimique. Avec, à la clé, des propriétés bien

différentes. Exemple: autant les grains de soufre ou de nitrate réfléchissent beaucoup la lumière du soleil, autant les suies carbonées les absorbent et réchauffent l'atmosphère –leur élimination est donc en tout point bénéfique. «*Il se produit aussi des réactions chimiques complexes et certains aérosols s'associent dans l'air; ce qui influe sur leurs capacités radiatives*», évoque Robert Allen. Alors que le CO<sub>2</sub> se mélange uniformément dans l'atmosphère pour y demeurer des siècles, les aérosols montrent, eux, une grande hétérogénéité: ils restent assez proches de leur zone d'émission →

**-80%**

C'EST LA PART DE PARTICULES SOUFRÉES QUE L'EUROPE A ÉLIMINÉE DEPUIS 40 ANS. OR CELLES-CI RÉFLÉCHISSAIENT LA LUMIÈRE SOLAIRE, JUGULANT LE RÉCHAUFFEMENT.

**+1°C**

C'EST LA HAUSSE DES TEMPÉRATURES ESTIVALES PROVOQUÉE EN EUROPE CENTRALE ET DE L'EST PAR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR DEPUIS 1980.

**C'est l'une des principales sources d'incertitude pour le climat futur**

Robert Allen, climatologue à l'université de Californie



## Enquête

# LA BAISSÉ DES AÉROSOLS PROVOQUE AUSSI D'AUTRES DÉRÈGLEMENTS

et retombent en quelques jours au sol, ce qui ne facilite pas les mesures.

La principale source d'incertitude reste toutefois l'influence de ces particules sur les nuages : elles en changent la taille et le nombre de gouttelettes d'eau, ce qui modifie leurs propriétés réfléchissantes et leur durée de vie. « Les nuages jouent un rôle primordial dans l'équilibre radiatif de la planète, ces petites modifications pourraient donc avoir de grandes conséquences », avertit Pascal Polonik.

### PLUS FORT QUE LE CO<sub>2</sub>

Or personne n'arrive encore à cerner dans le chaos de l'atmosphère les détails de ces changements, qui dépendent énormément des conditions de vents, d'humidité, d'altitude, du type de nuage en question – les cirrus ne réagissent pas comme les cumulonimbus. « Ce sont des systèmes très complexes, on a vraiment du mal à comprendre... Depuis le début de ma carrière, le niveau d'incertitude n'a guère diminué », confie Nicolas Bellouin, professeur à l'université de Reading. Inutile de préciser que les modèles climatiques actuels, d'une résolution de 100 km, sont bien en peine de reproduire des processus physiques qui se déroulent parfois à l'échelle du micromètre à l'intérieur des nuages. En attendant, il faut se contenter de résultats souvent contradictoires, tantôt optimistes – finalement, les aérosols n'ont

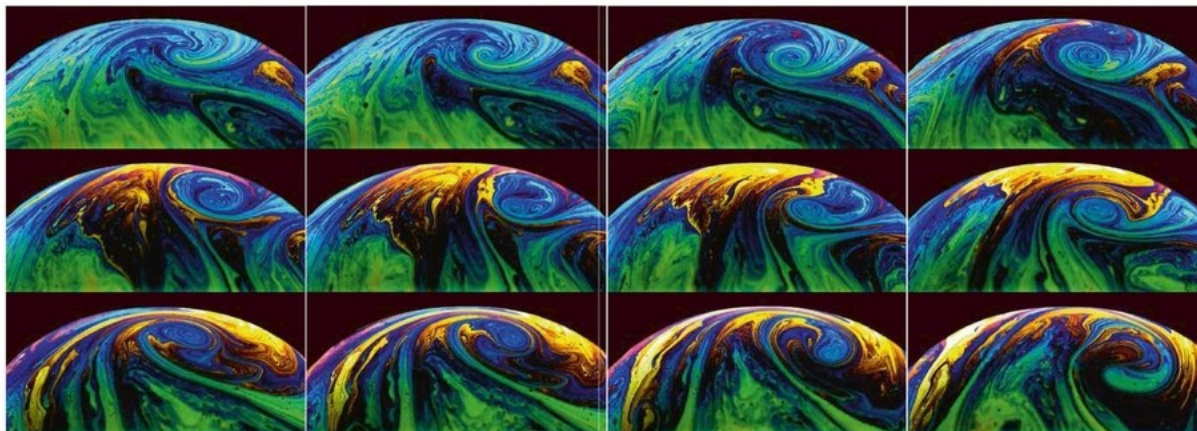
pas refroidi tant que ça le climat –, tantôt pessimistes, comme cette étude parue il y a quelques mois : « Notre analyse d'environ deux millions de trajectoires de navires montre que les particules libérées par leurs cheminées rendent les nuages plus réfléchissants qu'attendu, témoigne Peter Manshausen, doctorant à l'université d'Oxford. Il faut encore réunir des preuves de ce refroidissement accru dans d'autres domaines, mais cela pourrait signifier que la dépollution provoquera un plus fort réchauffement à l'avenir. » Un redoutable excédent de 1°C n'est pas à exclure...

Or le nettoyage de l'atmosphère ne se contentera pas d'avoir un impact sur les températures moyennes. Malgré

toutes les incertitudes, une nouvelle génération d'études commence à percevoir d'autres effets climatiques. Plusieurs modèles indiquent même que les phénomènes de canicule et de précipitations extrêmes se montrent plus sensibles aux aérosols qu'au CO<sub>2</sub>.

### MÊME LE GULF STREAM

« Ces particules ont des effets radiatifs plus localisés, exacerbés, non linéaires », avance Alcide Zhao, de l'université de Reading. « Les mécanismes peuvent être différents de ceux des gaz à effet de serre, on ne comprend pas tous les détails, mais on y travaille », informe Bjorn Samset, du Center for International Climate Research, à



### DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

Les aérosols ont une influence sur le cycle de l'eau et sur la circulation atmosphérique : plusieurs études suggèrent que la dépollution pourrait provoquer une plus forte probabilité de précipitations extrêmes, notamment en Asie de l'Est.

### DES MOUSSONS PLUS INTENSES

Pour le coup, c'est plutôt une bonne nouvelle : l'élimination des aérosols devrait pouvoir réactiver le système de mousson asiatique, actuellement entravé par les suies carbonées ; d'autres régimes de pluie reprendront, comme au Sahel, où l'on attend un gain de 10 % à la fin du siècle.

### DES CANICULES PLUS SÉVÈRES

Une diminution rapide des particules réfléchissantes risque d'entraîner une forte hausse des températures les plus extrêmes : selon une récente étude internationale, celles-ci pourraient s'élever de 30 % en Europe et même de 40 % en Chine à l'horizon 2050. Un effet encore plus sensible que celui des gaz à effet de serre.

### PLUS DE CYCLONES

Océan réchauffé, jet-stream perturbé... Une analyse publiée il y a un an montre que la forte baisse de la pollution en Europe et aux États-Unis depuis 1980 a provoqué une augmentation de plus de 30 % du nombre de cyclones dans l'Atlantique Nord. Une tendance qui devrait bientôt concerner le Pacifique, avec la dépollution asiatique.



## Une forte baisse des polluants pourrait décaler vers le nord la bande de pluies tropicales

Annica Ekman, météorologue à l'université de Stockholm

Oslo. Plus généralement, « les travaux récents montrent que les aérosols ont un impact sur la circulation atmosphérique, les vents, le jet-stream, les moussons », souligne Robert Allen.

Ces dernières décennies, ces particules de pollution ont en effet profondément déséquilibré certains régimes de pluie ; ils ont été pointés du doigt dans les terribles sécheresses ayant touché le Sahel durant les années 1980. « La plus grande concentration de particules dans l'hémisphère Nord a décalé vers le sud la zone de convergence intertropicale, affectant les précipitations sur le Sahel, l'Amazonie, l'Himalaya », évoque Annica Ekman. On s'attend à ce qu'une forte baisse des polluants entraîne cette fois

un décalage vers le nord de la bande de pluies tropicales. » Un retour de balancier bienvenu pour certaines régions : l'amélioration de la qualité de l'air aux États-Unis a déjà permis d'augmenter les précipitations au Sahel. La mousson d'Asie du Sud devrait aussi reprendre du poil de la bête. Même si d'autres effets plus sournois pourraient frapper à longue distance, loin des zones polluées – puis dépolluées : « Notre dernière étude révèle que l'élimination des particules sulfatées devrait être une cause majeure de convergence intertropicale en Arctique dans les décennies à venir », s'inquiète Knut von Salzen, de l'université de Victoria, au Canada. Quelques modèles entrevoyent un effet également sur les



## Lenquête

circulations océaniques: la réduction de la pollution dans l'hémisphère Nord semble entraîner un affaiblissement du grand courant de retournement de l'Atlantique, dont fait partie le Gulf Stream –considéré comme le thermostat de cet hémisphère, excusez du peu. Une étude américaine envisage aussi un ralentissement de la circulation dans le Pacifique Est tropical, avec d'éventuelles conséquences sur le considérable El Niño.

On l'aura compris: en parallèle des gaz à effet de serre, les aérosols vont provoquer leur lot de changements climatiques. Quand bien même, ces dérèglements sont restés jusqu'ici un impensé des négociations internationales; on en parle à peine dans les COP. *«Je pense que le degré de complexité des aérosols a tout de suite arrêté les conversations sur le sujet, que ce soit pour expliquer le problème au grand public ou évoquer auprès des décideurs les larges incertitudes»*, glisse Stuart Jenkins. Si bien que *«presque aucun pays ne mentionne les aérosols dans ses engagements officiels pour l'Accord de Paris. Cela crée beaucoup d'ambiguïtés sur les conséquences sanitaires et climatiques de leur trajectoire vers la neutralité carbone»*, déplore Pascal Polonik. *«Les pays ne font pas d'inventaire détaillé des différentes espèces d'aérosols qu'ils émettent, c'est un vrai manque pour la décision politique et la connaissance scientifique*, lâche de son côté Duncan

## Polluer la stratosphère pour refroidir la Terre ?

L'idée est maintenant bien connue: il s'agirait de répandre depuis des avions situés à 20 km d'altitude des particules de soufre ou de carbonate de calcium pour créer un effet parasol filtrant une partie du rayonnement solaire; une autre option serait d'éclaircir les nuages marins en injectant des cristaux de sel. Cette géo-ingénierie de dernier recours inquiète profondément les scientifiques, qui craignent des effets collatéraux sur le climat et un rebond brutal des températures en cas d'arrêt des opérations. Pour autant, le concept commence à en démanger certains: des premiers programmes de recherche ont été lancés aux États-Unis, deux expériences d'éclaircissement viennent d'avoir lieu au large de l'Australie et une start-up américaine, Make Sunsets, se targue d'avoir envoyé il y a quelques mois –sans la moindre autorisation– deux ballons de soufre dans la stratosphère...

Watson-Parris, de l'université d'Oxford. *Ces lacunes rendent plus difficile l'évaluation des scénarios qui nous permettraient de rester sous les 1,5 ou 2°C.»*

### PAS DE DILEMME

*«Il faut bien avoir conscience que la dépollution devrait être le facteur dominant des changements climatiques dans certaines zones du monde»*, alerte Robert Allen. *«À l'échelle régionale, les aérosols peuvent avoir un effet nettement différent de celui des gaz à effet de serre: il faudrait pouvoir injecter ces informations dans les outils d'évaluation des risques, pour que l'on puisse se préparer au mieux»*, clame Bjorn Samset, auteur dernièrement d'un éditorial véhément sur ce thème dans la revue Nature.

Le message commence à être entendu, avec la création de nouvelles plateformes de modèles prenant mieux en compte la pollution, comme RAMIP. Une poignée de laboratoires s'essaie aussi à simuler les meilleures trajectoires vers la neutralité carbone, conciliant réchauffement global et qualité locale de l'air. *«Il faudrait vraiment éviter de mettre en place des mesures antipollution sans réduire les émissions de gaz à effet de serre, comme l'a fait la Chine cette dernière décennie»*,

grâce Robert Allen; autant dire, ouvrir les persiennes tout en continuant de chauffer la pièce à fond.

Soyons clairs: aucun scientifique digne de ce nom ne conteste le fait qu'il faille annihiler la pollution et ses maux, et tous insistent sur la nécessité absolue de réduire rapidement les gaz à effet de serre... Personne ne demande de faire un choix radical entre mauvaise qualité de l'air et réchauffement, entre la peste et le choléra. Le dilemme moral est vite évacué. *«La priorité a été donnée à la santé publique... Y compris lorsqu'il s'agit des émissions de navires au milieu de l'océan générant un refroidissement qui aurait peut-être été bon à prendre»*, évoque Olivier Boucher; *«même si l'industrie a un temps utilisé l'argument du refroidissement face aux nouvelles réglementations antiparticules»*, tance Nicolas Bellouin.

Mais la politique de l'autruche n'est plus tenable. Il s'agit maintenant de prendre la mesure de tous les changements à venir, et d'évaluer les éventuels effets secondaires de la grande transition en marche. Même si c'est compliqué. Même si c'est dérangeant.

Retrouvez nos sources sur [epsiloon.com/sources](http://epsiloon.com/sources). Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par [Epsilon](http://Epsilon).

## Presque aucun pays ne mentionne les aérosols dans ses engagements pour l'Accord de Paris

Pascal Polonik, chercheur à l'Institut d'océanographie Scripps



Quelle Histoire

# VOS ENFANTS VONT ADORER L'HISTOIRE

Avec les livres *Quelle Histoire*, découvrez les grands personnages, époques et civilisations qui ont fait notre monde !



RETROUVEZ TOUTE LA COLLECTION SUR [QUELLEHISTOIRE.FR](http://QUELLEHISTOIRE.FR)



# Labyrinthe

## LE CASSE-TÊTE DE LA PILULE

Modification des formules, variabilité des prix, découverte d'effets, changements de réglementation, manque d'information, barrières d'accès, multiplication des alternatives... La pilule reste un imbroglio complexe de bénéfices et de risques.

### Une exception française

**36 %**

C'est la contraception la plus utilisée par les Françaises, contre 18% en moyenne en Europe et 16% dans le monde.

#### Prescrite en premier

Chez 60% des 15-24 ans. Le stérilet est plus courant chez les femmes ayant déjà procréé.

**MAIS** son utilisation a baissé de 15% en 10 ans. Tandis que la prescription de stérilet non hormonal a été multipliée par 1,8 dans le même temps.

#### 81 références de pilules

Leur dosage peut varier au cours du cycle, mais deux grands types se distinguent selon les hormones utilisées.

### Fiable et efficace

les pilules œstroprogestatives,

ou combinées, contiennent un progestatif et un œstrogène: elles bloquent l'ovulation. Il y en a 4 générations selon le progestatif utilisé.

les pilules progestatives

ne contiennent qu'une seule hormone, un progestatif qui modifie la paroi de l'utérus pour empêcher l'implantation d'un ovule fécondé.

#### Multi-usages

La pilule peut aussi traiter règles douloureuses, acné ou hyperpilosité.

**OUI, MAIS** à l'adolescence, où elle est souvent multitraitements, elle augmente le risque dépressif.

#### Rapidement réversible

Les taux de grossesse un an après l'arrêt sont similaires à ceux rapportés sans contraception.

**SANS COMPTER** que son efficacité peut diminuer combinée avec un antiépileptique, un antituberculeux ou un antirétroviral.

**39 %**

des 21-29 ans disent avoir oublié leur pilule au moins une fois dans le dernier mois.

**SACHANT QUE** le médecin ne la prescrit en plus que pour 6-12 mois et le pharmacien ne la délivre que pour 3 mois.

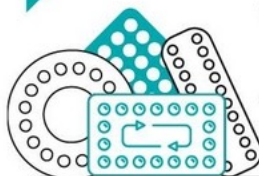
**CE QUI** en fait, en théorie, un moyen quasiment aussi efficace que l'implant et le stérilet. Mais on est plutôt à 8% d'accidents.

**0,3 %**

des femmes sous pilule tombent enceintes durant l'année de prise.

PAR HÉLOÏSE RAMBERT  
SOURCES: ANSM; SANTÉ PUBLIQUE FRANCE; ONU; OMS; INSERM; D. MANSOUR ET AL. (2011); OPINION HEALTH; INCA; C. ANDERL ET AL. (2021); HAS; CN60F

## Un risque cardiovasculaire accru



Thromboses veineuses profondes, phlébites, embolie pulmonaire... En cause: les œstrogènes, qui favorisent la coagulation, et donc la formation de caillots dans les veines.

**x3 à x6**

Le risque de maladie veineuse thrombo-embolique augmente sous pilule combinée.

#### Alerte sur les pilules de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> générations

Le risque de thrombose est 2 fois plus élevé qu'avec celles de 2<sup>e</sup> génération (où le lévonorgestrel sert de progestatif). Elles sont déremboursées depuis 2013 afin de réduire leur prescription.

**CERTES,** il reste inférieur à celui qui existe lors de la grossesse (x6 à x10).

**MAIS** en 2023, 14% des ventes de pilules combinées restent des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> générations – pour cause d'intolérance à la 2<sup>e</sup> génération.

#### Des facteurs de risque non négligeables

Tabagisme, hypertension, hypercholestérolémie, diabète, obésité, hérédité... augmentent les risques d'accidents vasculaires artériels, exigeant examens et suivis.

**POURANT,** elles sont en baisse, au bénéfice des progestatives: multipliées par 2 en 10 ans.

## Des effets discordants sur les cancers

Avec un léger sursurrisque pour certains cancers, mais protectrices contre d'autres, les pilules sont surveillées de près par la communauté médicale et scientifique.



**-25 %**

de risque de cancer de l'endomètre avant 75 ans avec une pilule combinée prise pendant 5 ans.

**-40 %**

de risque de cancer de l'ovaire avec une pilule combinée prise au moins 10 ans.

#### De nouvelles prises en charge

Depuis 2022, le coût de la contraception est pris en charge à 100% pour les moins de 26 ans, et depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2023, les préservatifs sont gratuits en pharmacie. Ce qui pourrait aider à mieux répartir la charge mentale et financière de la contraception entre hommes et femmes.

**RESTE QUE** pour les plus âgées et celles qui optent pour des solutions non prises en charge, le coût mensuel peut être multiplié par 5.

**3 à 10€** par cycle sous pilule

contre 1€ et 1,7€ de reste à charge pour le stérilet hormonal et l'implant; 15€ pour les patches et les anneaux.

#### SAUF QUE

développer une contraception masculine coûte cher et qu'elle rongerait des parts de marché sur les pilules féminines.



#### Une pilule hormonale masculine efficace

Elle contrôle la fabrication des gamètes avec peu d'effets secondaires, mais il lui faut quelques mois avant d'être efficace. Des pistes non hormonales sont aussi à l'étude.

Pour 91% des hommes interrogés par l'institut CSA en 2012, la contraception doit être « autant l'affaire de l'homme que de la femme » et 61% se déclareraient prêts à prendre une pilule masculine.

## Vers une contraception mieux partagée ?

#### Un sursurrisque pour les cancers hormonodépendants

Du col de l'utérus, du foie, du sein: il augmente légèrement sous pilules combinées et progestatives, mais revient à la normale 10 ans après l'arrêt.



## L'IDÉE D'APTITUDES GÉNÉTIQUES EST POURTANT BIEN ANCRÉE

1920

Le professeur de psychologie américain Lewis Terman soutient que les gens talentueux ont avant tout un solide patrimoine génétique.

1994

Selon le psychologue Richard Herrnstein, les différentes trajectoires sociales résultent de QI innés.

2014

La psychologue cognitive Brooke Macnamara montre que des techniques d'entraînement rigoureuses n'expliquent que 12% de l'excellence.

2018

Robert Plomin, spécialiste de la génétique du comportement, affirme que la génétique influe plus sur notre personnalité et notre réussite que l'environnement.

**L**es parents et les écoles influent peu sur la réussite des enfants», titrait fin janvier un hebdomadaire français. La génétique comportementale fait un retour en force. Les études tentent d'associer nos gènes à nos comportements se multiplient. Et la tentation ressurgit d'ériger notre patrimoine génétique en seul déterminant de nos destins. Pour Samah Karaki, cette hypothèse est non seulement dangereuse, mais surtout scientifiquement fautive.

**On peut donc affirmer, selon vous, que le talent n'est pas inné ?**

Il ne peut pas l'être, parce qu'il n'y a pas de relation directe entre les gènes et les caractéristiques psychologiques. Si l'apport des données génétiques est indéniabla dans le domaine de la santé, l'idée populaire selon laquelle il existerait des gènes qui déterminent des traits humains complexes, comme les capacités intellectuelles, sociales, sportives ou artistiques, est tout simplement incorrecte.

**Certains scientifiques défendent pourtant l'idée d'un patrimoine génétique qui détermine certains traits de caractère, certaines aptitudes...**

Mais c'est faux! Les gènes seuls ne déterminent ni ne causent quoi que ce soit. Ils n'agissent pas isolément et ne peuvent en aucun cas être considérés comme des éléments liés à un caractère de manière univoque. La génétique n'est pas déterministe: sa régulation et son expression sont conditionnées par le vécu. Dans toutes les études génomiques, il existe des tas de facteurs invisibles, liés par exemple à la

géographie, la culture, l'alimentation... Ces études sont biaisées par ces interactions non contrôlables entre gènes et environnement, qui sont impossibles à démêler. En résumé, elles peuvent démontrer des corrélations, mais en aucun cas une causalité.

**L'idée que le QI est un produit de nos gènes semble pourtant revenir en force ?**

La définition que nous donnons au talent subit une contingence culturelle et historique: le test de QI a été développé en 1904 afin de trier les élèves capables d'accéder à l'éducation. Ces tests sont donc loin de refléter la complexité de la question de l'intelligence. D'ailleurs, la population mondiale a gagné plusieurs dizaines de points de QI en cent ans. Or il n'est pas question sur un temps aussi court d'attribuer cela à une évolution génétique, mais plutôt à l'accès à l'éducation. Sans compter que le QI varie aussi à l'échelle d'une vie: statut socio-économique, années d'études en plus, stéréotypes, nourriture, polluants, stress, sommeil... sont autant de facteurs environnementaux jouant sur son évolution.

**Mais notre histoire est jalonnée de génies: Mozart, Einstein...**

C'est ce que nous nous racontons: dans la biographie de ces génies, nous sélectionnons ce qui nous séduit. Mais



# Le talent n'existe pas

Samah Karaki

Cette neuroscientifique a étudié la régulation génétique liée au stress dans les comportements sociaux et émotionnels à l'université Pierre et Marie Curie, avant de fonder le Social Brain Institute à Paris, en 2016.

en réalité, pour exceller, personne n'échappe à la dictature des circonstances. À chaque « génie » sont associés un environnement et l'accès à un dispositif d'entraînement particuliers. Mozart avait cumulé 3500 heures de pratique avant six ans! Sans son père, violoniste, compositeur et pédagogue acharné, le nom de Mozart serait peut-être inconnu aujourd'hui. On lit aussi souvent que Kylian Mbappé « vient de nulle part ». Mais son père était son entraîneur et sa mère était handballeuse professionnelle. Alors non, Mbappé ne vient pas « de nulle part », il vient d'une famille très sportive qui l'a porté.

**Certaines personnes ne bénéficient-elles pas tout de même de facilités ?**

Nous pouvons avoir des prédispositions génétiques qui nous permettent d'apprendre avec plus d'aisance, mais

pour en juger, il faut d'abord s'assurer que tout le monde bénéficie d'un environnement permettant à ces avantages de s'exprimer. S'ajoutent également aux prédispositions génétiques et aux barrières systémiques l'expérience façonnée par tous les hasards de la vie: tout cela interagit et crée quelque chose de très singulier. Impossible donc de déterminer de manière directe et simpliste le lien entre notre bagage biologique et ce que nous sommes ou ce que nous serons.

**Le « talent » est donc potentiellement accessible à tous ?**

Disons plutôt que cette notion de « talent » disparaît. Et ce changement de perspective est loin d'être anecdotique. Les psychologues sociaux parlent « d'erreur d'attribution fondamentale »: accorder autant d'attention à la personnalité, aux aptitudes, et donc au talent, masque en effet à quel point le contexte et l'environnement jouent sur

nos actions et sur ce que nous sommes. Or, être fascinés par des génies aux talents exceptionnels, considérer le talent comme inné nous empêche de lutter contre l'immobilité sociale. Le cerveau est plastique. Il est à l'image de ce que l'on pratique, mais aussi de ce que l'on se croit capable ou légitime de pratiquer. Nos croyances nous façonnent autant que nos expériences vécues. Et si on détricote l'idée du talent pour lui préférer la notion d'apprentissage et de développement, on autorise notre cerveau à accéder à des stratégies, des inspirations et des croyances qui lui permettent de se réinventer. Cela change tout!

PROPOS RECUEILLIS  
PAR ALEXANDRA PHEN  
ILLUSTRATION RÉALISÉE PAR  
DAVID DESPAU, COLAGÈNE.COM

## L'impact de la production alimentaire

Émissions de CO<sub>2</sub>, consommation d'eau, déversements de phosphore et d'azote, destruction d'habitats... Alors que la production alimentaire est au banc des accusés, une nouvelle étude livre à l'échelle de la planète un verdict précis. Et redoutable.

PAR LÉA DESRAYAUD  
SOURCE: B. S. HALPERIN ET AL., NAT. SUSTAIN., OCTOBRE 2022

**92,5%** de l'impact environnemental se joue sur 10% des espaces dédiés à la production alimentaire, qui perturbe au total 17 millions de km<sup>2</sup> d'habitats.

**1 390 milliards de m<sup>3</sup>** d'eau utilisés chaque année, plus de **6 milliards** de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> rejetées, **140 millions** de tonnes de phosphore et d'azote.

**9,9%** de l'empreinte environnementale est due à la pêche et à l'aquaculture, alors qu'elles ne fournissent que **1,1%** de la nourriture mondiale.

**1<sup>er</sup>** La France est le pays européen à l'impact le plus fort.

**15%** de l'empreinte globale vient de la production de porc, **14%** de la viande de ruminants (bovins, ovins), **10%** du riz et **9%** du blé.

La production de viande contribue pour 73% de l'empreinte agricole du **Brésil**. En cause: le méthane émis par les ruminants, le phosphore et l'azote de leurs déjections, la production de céréales pour les nourrir.

La production de céréales pour l'alimentation animale est responsable d'un tiers de la pollution agricole des **États-Unis**. Même si cultiver du soja est ici 2,4 fois moins polluant qu'en Inde.

En **Norvège**, la pression environnementale est surtout maritime: 88% contre 10% en moyenne dans le monde. Il faut dire que le pays est le 2<sup>e</sup> exportateur de poissons au monde, après la Chine.

Premier exportateur de blé, la **Russie** a pourtant un impact relativement faible sur l'environnement grâce à des rendements céréaliers à la hausse.

70% de l'impact agricole de l'**Inde** est lié à ses cultures destinées à l'alimentation humaine: riz et blé consommés énormément d'eau.

Les terres de la **Péninsule arabique** ne sont pas propices à l'agriculture: la région importe une large part de ses denrées, impactant de ce fait d'autres régions du monde.

Le **Maroc** abandonne progressivement la culture de sorgho au profit notamment du millet: avec un rendement 2 fois plus élevé à l'hectare, il est 6 fois moins impactant.

Pression environnementale cumulée, en proportion de l'impact mondial de la production alimentaire

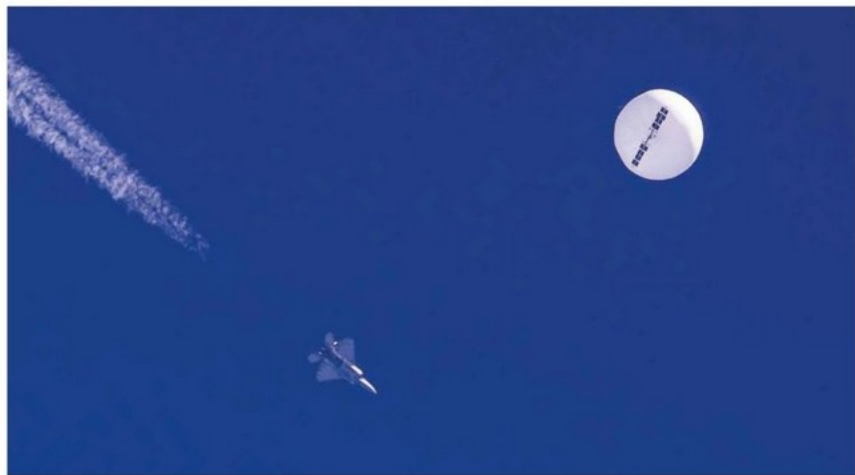
Faible ← [gradient bar] → Forte

L'empreinte environnementale de l'**Indonésie** est alourdie par ses élevages de porcs, 5 fois plus dommageables que ses troupeaux de bœufs.



# C'est dans l'air

L'HISTOIRE SE RÉPÈTE



## Quand les ballons espionnent

Le 4 février 2023

**Les États-Unis abattent un potentiel mouchard chinois**

Huit jours après son repérage en Alaska et son périple du Montana à la Caroline du Nord, un ballon-sonde est abattu au-dessus de l'océan Atlantique. La Chine, qui reconnaît la paternité de l'engin, assure qu'il s'agit d'un ballon météo égaré. Mais pour les États-Unis, il ne fait aucun doute qu'il a pour objectif l'espionnage militaire. Les débris récupérés permeront peut-être de trancher...

Le 7 juillet 1947

**Un objet non identifié s'écrasait à Roswell**

L'événement a nourri la thèse extraterrestre jusqu'à la révélation de la commission d'enquête sénatoriale américaine, en juillet 1995. La soucoupe volante n'est que l'un des ballons-sondes envoyés, en pleine guerre froide, par les États-Unis vers l'URSS. Bardé de micros et de transmetteurs radio, il espionnait l'avancement des essais nucléaires en captant les ondes émises par les détonations.

En juillet 1916

**Les aérostats observaient les champs de bataille**

Sur une idée de l'ingénieur français Albert Caquot, le ballon type M est le premier à résister à des vents de 90 km/h grâce à trois empennages souples placés à l'arrière. Entre juillet et novembre 1916, 46 d'entre eux seront livrés aux Alliés. Les observations des aérostats circulent le long d'un fil téléphonique placé à l'intérieur du câble en acier qui retient le ballon au-dessus du champ de bataille.

Le 26 juin 1794

**Le premier ballon de repérage militaire s'envolait**

Gonflé à l'hydrogène et relié au sol par un câble, *L'Entrepreneur* fait 9 m de diamètre et s'élève à 500 m d'altitude. Déployé par l'armée révolutionnaire française lors de la bataille de Fleurus pour espionner les troupes adverses, il participe à la victoire contre les coalisés. Les informations sont transmises par des drapeaux de signalisation ou de simples notes descendues dans un sac. **A.P.**

POLÉMIQUE

## Faut-il interdire les arômes des e-cigarettes ?

Marshmallow, ananas-coco, menthe givrée... Les saveurs des cigarettes électroniques se multiplient. Les formats aussi : pods et puffs (jetables), snuff (nicotine en poudre)... L'offre explose pour mieux coller aux goûts du jeune public, dénonce le Comité national contre le tabagisme. Qui appelle à interdire tous les arômes, autres que celui du tabac. « Avec des parfums rappelant les confiseries, l'industrie du tabac hameçonne les enfants. Or la nicotine est une drogue dure », alerte Yves Martinet, président du comité. Les chiffres le confirment, les ados sont de plus en plus tentés : un lycéen sur deux l'a essayée en 2020, 17 % de plus qu'en 2015. Et même si moins de 3 % des élèves de 3<sup>e</sup> vapotent en France tous les jours, aux États-Unis, selon la dernière enquête nationale, la e-cigarette a détrôné la cigarette chez les jeunes, qui plébiscitent les modèles jetables et aromatisés. Or, loin d'être anodins, ces derniers empiètent les dégâts de la nicotine, révèle la première vraie étude comparative, publiée en février dernier par une équipe californienne : dans les cellulules de la bouche, l'ADN est endommagé à des niveaux comparables à ceux des fumeurs. Un indice de leur effet cancérigène. « Parmi les vapoteurs, les dégâts sont plus importants avec les arômes sucrés et les pods », ajoute Ahmad Besaratinia, un des auteurs de ces travaux. Quant à l'aide au sevrage, aucune étude ne montre qu'elle serait favorisée par l'ajout d'arômes. **F.G.**



CHARTER/SHUTTERSTOCK

À PART ÇÀ



## Des côtes de plus en plus menacées

2500 km<sup>2</sup> de terres supplémentaires – l'équivalent du Luxembourg – ont été grignotées le long des côtes entre 2000 et 2020. 70 % de ces extensions dans le monde sont placées dans des zones menacées par l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2100.



## La discrimination baisse en France

La discrimination raciale et ethnique des candidats à l'embauche a été passée à la loupe pendant plusieurs décennies au Canada, en France, Allemagne, Grande-Bretagne, Pays-Bas et États-Unis. Verdict : la France est le seul pays dans lequel elle a diminué.



## En Europe, 1 voiture neuve sur 10 est électrique

En 2022, le nombre d'immatriculations de voitures 100 % électriques a continué de bondir. Elles représentent désormais 12,1 % du marché, soit 3 points de plus qu'en 2021. En France, leurs ventes (13 %) ont même dépassé celles des diesels en janvier.



## Seule la moitié des bébés sont allaités

Ce taux n'a jamais été aussi bas dans le monde. Contrairement aux recommandations de l'OMS, moins d'un nouveau-né sur deux est allaité exclusivement pendant six mois. Dans le viseur des chercheurs : le marketing agressif des fabricants de lait infantile.

# Big data

## FRANÇAIS ET AMÉRICAINS SE METTENT À PARLER AIGU

Cela capte l'attention du bébé et permet de transmettre des intentions, des encouragements, ainsi que de l'affection. À mesure que l'enfant grandit et que les mots acquièrent un rôle dans la communication, l'accentuation s'atténue.

## LES NORVÉGIENS EXAGÈRENT LES AIGUS, MAIS AUSSI LES GRAVES

Sans doute pour clarifier les intentions. Un ton grave peut notamment changer le comportement d'un bébé en s'appuyant sur le réflexe de sursaut acoustique. En italien, les variations déjà très fortes de la langue minimisent cet effet.

## ON ARTICULE PLUS, SURTOUT EN CANTONAIS

Et c'est encore plus fort quand on lit. Une attitude que l'on utilise aussi quand on s'adresse à des personnes dont ce n'est pas la langue maternelle ou ayant des difficultés de langage.

## EN SUÉDOIS, LES VOYELLES SONT SURACCENTUÉES

Mais raccourcies, ce qui aiderait les enfants à les distinguer et à reconnaître plus rapidement les mots prononcés. En danois, les voyelles sont simplifiées, pour être plus facilement reproductibles.

Différence entre la manière de parler à un adulte et à un enfant de moins de 3 ans

FRANÇAIS  
HONGROIS  
ANGLAIS AMÉRICAIN  
NORVÉGIEN  
ITALIEN  
ALLEMAND  
CORÉEN  
JAVANAIS  
TAGALOG PHILIPPIN  
ANGLAIS AUSTRALIEN  
MANDARIN  
NÉERLANDAIS  
RUSSO  
QUICHÉ MAYA  
DANOIS  
KENTAN  
ANGLAIS ÉCOTLANDAIS  
ANGLAIS CANADIEN  
TAMOUL SRI-LANKAIS  
ANGLAIS ÉCOSSAIS  
ANGLAIS JAMAICAÏN  
JAPONAIS  
CANTONAIS  
SUÉDOIS  
ESPAGNOL

FREQUENCE MOYENNE

VARIABILITE DU TON

ARTICULATION

ACCENTUATION DES VOYELLES

DUREE DES VOYELLES

absence de données

# Chaque langue s'adapte aux bébés

PAR LÉA DESRAYAUD

SOURCE : C. COX ET AL., *NAF, HLM, BHM*, OCTOBRE 2022

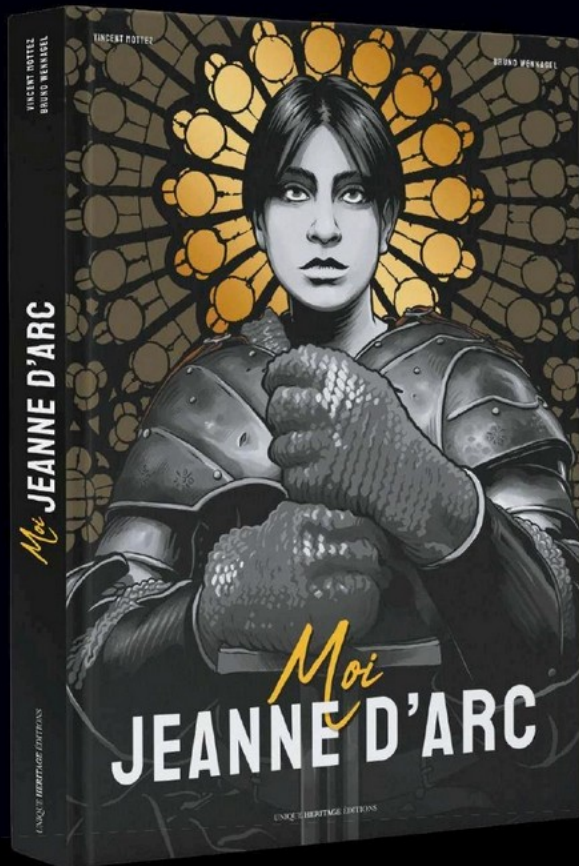
## D'où viennent ces données

Une équipe de linguistes français, suédois, britannique et américain a rassemblé 87 études pour analyser les modifications de la façon de parler des adultes avec de jeunes enfants, dans 25 langues.

## LES BRITANNIQUES FONT DURER LES VOYELLES

Afin de motiver l'enfant à écouter, et de faciliter le développement du langage en soulignant les différences phonologiques, les débuts, les fins de phrases...

Alors qu'en japonais, les syllabes de fin de mots sont déjà longues : la façon de parler change peu.



LE PREMIER ROMAN GRAPHIQUE  
CONSCRÉ À LA PLUS CÉLÈBRE HÉROÏNE DE

*l'Histoire de France*



# LA PHYSIQUE PASSE, DU CÔTÉ OBSCUR

Ces dernières années, les physiciens ont dû s'y faire: impossible de détecter les particules prévues, celles qui complètent leur table des matières. Alors ils se sont mis à imaginer de nouvelles créatures fantomatiques, qui interagiraient très peu avec notre monde. Et à bâtir des détecteurs hors norme. La traque est plus trépidante que jamais. Bienvenue dans le secteur sombre.

PAR SIMON DEVOS ET MATHILDE FONTEZ

**44**  
LE PHOTON NOIR

**46**  
LE NEUTRINO SOMBRE

**48**  
LE HIGGS SOMBRE

**50**  
L'AXION

**52**  
AU CŒUR  
DES TÉNÉBRES

C'

est le nouveau terrain de jeu des physiciens des particules. Un monde pour l'instant purement théorique, mais déjà incroyablement prolifique: des particules inédites à la pelle et de nouvelles forces, vectrices d'échanges incessants. Tout un univers en somme, qui coexisterait avec le nôtre tout en nous restant totalement invisible. Certains poussent même jusqu'à l'imaginer peuplé d'atomes, de molécules, d'objets macroscopiques... voire d'astres, aussi gigantesques que nos étoiles!

#### OUVRIR UNE PORTE

«C'est un champ de recherche nouveau et extrêmement excitant, s'exclame Matheus Hostert, physicien à l'Institut Perimeter, au Canada. D'un point de vue théorique, nous pouvons tout imaginer. Et côté expérimental, cela nous oblige à nous creuser la tête pour trouver des moyens de détecter des traces, même infimes, laissées par ce monde invisible.» «C'est peut-être enfin la porte vers une toute nouvelle physique, celle dont nous attendons les signaux depuis des décennies», s'emballe Joachim Kopp, du CERN.

Ce vertigineux bac à sable conceptuel porte un nom: le secteur sombre. Et il fait l'effet d'une grande bouffée d'air frais pour les physiciens, orphelins de tout cadre théorique tangible depuis une dizaine d'années. Car si le «modèle standard», cette grande théorie de la matière inventée

dans les années 1970 a fait la preuve d'une redoutable efficacité pour décrire toutes les particules et leurs interactions, il laisse 95% de l'Univers inexpliqués. Il ne dit rien de cette matière noire que les astronomes voient peser sur les mouvements des étoiles et des galaxies. Rien non plus de cette énergie noire qui accélère l'expansion du cosmos. À vrai dire, il ne dit rien de la gravitation... «Tout indique que la totalité des quarks, des électrons et autres neutrinos que nous connaissons ne représente qu'un maigre cinquième de la matière totale de l'Univers», évalue Yann Mambrini au IJCLab, le Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie. «Nous savons qu'il y a bien d'autres choses que la matière composant les galaxies, les étoiles et tout ce que nous percevons», renchérit Neal Weiner, physicien à l'université de New York.

Pis, le Large Hadron Collider (LHC), instrument principal de la physique des particules logé dans son tunnel du CERN, près de Genève, a parachévé ce modèle standard, dénichant en 2012 sa pièce maîtresse: le boson de Higgs, dix-septième particule du modèle, la seule à ne pas avoir encore été découverte. Et... c'est à peu près tout. «Nous pensions trouver rapidement une flopée de nouvelles particules lourdes, rappelle Sébastien Descotes-Genon, directeur de recherche CNRS à l'IJCLab. Cela n'a pas été le cas.» En particulier, aucun signe de la supersymétrie, cette théorie qui avait séduit des bataillons de physiciens pendant trente ans tant elle complétait élégamment le modèle. Pas de wimps non plus, ces particules massives et peu interactives, pourtant jugées pouvoir parfaitement incarner la matière noire. En plus de dix ans de fonctionnement, le LHC a eu beau fracasser

«Le secteur sombre pourrait être une porte vers un tout nouveau champ de la physique, inconnu jusqu'alors»

JOACHIM KOPP, PHYSICIN AU CERN

des protons avec une énergie démentielle, il a laissé les physiciens bien seuls. Et «quand nous sommes seuls longtemps, nous peuplons le vide de fantômes», écrivait Maupassant dans *Le Horta*...

Les chercheurs se sont donc tournés vers des fantômes: et si cette matière manquante était faite de particules analogues à celles du modèle standard, mais qui n'interagissent quasiment pas avec notre monde? «Elles pourraient être partout mais de manière prodigieusement discrète, puisqu'elles seraient insensibles à l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau de nos atomes et à l'électromagnétisme,

«Tout indique que la totalité de la matière que nous connaissons ne représente qu'un maigre cinquième de la matière totale que contient l'Univers»

YANN MAMBRINI, LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES DEUX INFINIS IRÈNE JOLIOT-CURIE

«Ces particules pourraient être partout autour de nous, mais de manière prodigieusement discrète»

NEAL WEINER, PHYSICIN À L'UNIVERSITÉ DE NEW YORK.

décrit Neal Weiner. Elles interagiraient légèrement via l'interaction faible, responsable de la désintégration des particules subatomiques, et seraient essentiellement sensibles à la gravitation, ce qui permet de les retenir comme candidates à la matière noire.»

#### 4 PARTICULES

Ainsi ont été tracés les contours du secteur sombre: une région dans laquelle masses et interactions sont limitées. Et très vite, il s'est avéré qu'il existait de multiples manières de l'aborder. Certaines particules remplissant les critères de ce secteur sont imaginées pour résoudre une

anomalie repérée dans le modèle standard. D'autres découlent de modèles plus globaux, comme la théorie des supercordes. Ou s'inspirent de phénomènes cosmiques comme les rayonnements des étoiles mourantes captés par les télescopes. «Études des étoiles à neutrons, cosmologie, physique des particules... Le secteur sombre est à la jonction entre des domaines de la physique qui, d'ordinaire, ne se parlent pas beaucoup», constate Luc Darné, MSCA fellow du programme européen Horizon 2020 à l'université de Lyon.

Pour ajouter à l'effervescence, les physiciens ont montré qu'en remplissant silencieusement l'espace autour

«C'est un champ de recherche nouveau et particulièrement excitant: tout y est possible»

MATHEUS HOSTERT, THÉORICIEN À L'INSTITUT PERIMETER, AU CANADA

de nous, ces particules légères pourraient expliquer quelques autres anomalies de la physique que celle de la matière noire. Et après plusieurs années de tâtonnements, les théoriciens ont identifié quatre portails vers le secteur sombre. Quatre particules qui, par le biais d'interactions rares, établiraient une forme de dialogue avec notre monde.

Imaginer un univers quasi-invisible et complexe, n'est-ce pas un peu tiré par les cheveux? «La simplicité peut être un redoutable biais, réagit Neal Weiner. Imaginez une professeure faite de particules sombres, notre univers lui paraîtrait extrêmement improbable.»







SHUTTERSTOCK

# PHOTON NOIR

## UNE FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE SOMBRE

Si des particules sombres existent, il faut qu'elles puissent échanger des photons. C'est ainsi que surgit dès les années 1980 la silhouette du photon noir, construit comme un équivalent de notre particule de lumière, mais pour ce secteur caché. Et comme la lumière, il serait porteur d'une interaction fondamentale, baptisée électromagnétisme sombre. L'intensité de cette nouvelle force serait cependant très faible – entre 1000 et 10000 fois plus ténue que l'interaction électromagnétique. Et elle ne concernerait pas notre matière classique qui n'y serait pas, ou très peu sensible. *« La plupart des modèles considèrent que, contrairement à nos photons, ceux du secteur sombre ont une masse »,* ajoute Anthony Thomas, de l'université d'Adélaïde. Et c'est aussi cet aspect pesant qui limiterait la portée de leur électromagnétisme – celui de nos photons agit à l'infini. Ce qui expliquerait que nous ayons du mal à déceler cette force. *« En nous appuyant sur la théorie et sur les expériences déjà réalisées, nous avons pu estimer la gamme de masses dans laquelle nous aurions le plus de chance de trouver des photons noirs, poursuit le chercheur. Entre 80 et 110 gigaelectronvolts (GeV). En dehors de cette fourchette, nous aurions eu de fortes chances de les avoir déjà trouvés. »* Une masse qui rivalise avec celle des

particules les plus lourdes du modèle standard. Le photon sombre serait donc très lourd... À moins qu'il ne soit ultra-léger ! C'est l'option avancée par d'autres modèles, sans doute la plus prometteuse : des photons noirs 10 milliards de milliards de fois moins massifs que l'électron seraient d'excellents candidats pour expliquer la matière noire. Selon une étude publiée en décembre 2022, ils pourraient même chauffer des filaments intergalactiques, un phénomène que vient justement d'observer le télescope spatial Hubble. Et pour couronner le tout, les photons sombres pourraient aussi fournir une explication au moment magnétique du muon, une bizarrerie observée dans les données du Fermilab, l'accélérateur de particules américain. Une interaction fantôme avec ces photons sombres expliquerait en effet l'écart entre valeurs théorique et expérimentale de ce paramètre. *« L'avantage des photons noirs est qu'ils pourraient se changer en photons lumineux et vice versa, par le biais d'un effet dit de mélange, autorisé par les lois de la mécanique quantique, précise Sébastien Descotes-Genon. Certaines expériences peuvent donc espérer mettre la main dessus, en recherchant des pertes d'énergie inexplicables ou des apparitions spontanées de particules juste après une collision. »*

### MASSE

Ultra-lourd, 80-110 GeV (100 fois plus qu'un proton), ou ultra-léger,  $10^{-14}$  eV

### FAMILLE

Boson de jauge, comme le photon

### SIGNES

#### PARTICULIERS

Porteur d'une interaction électromagnétique sombre, capable de se mélanger avec les photons

#### INVENTION

En 1986, par Bob Holdom, université de Toronto

# NEUTRINO SOMBRE

## UNE PARTICULE À L'OSCILLATION FRÉNÉTIQUE

« On les surnomme *neutrissimos*, sourit Carlos Argüelles-Delgado, qui les étudie à Harvard. *Ils seraient plus lourds que les neutrinos que nous connaissons, et interagiraient encore moins.* » Car rappelons-le : les neutrinos existent, même s'ils sont très furtifs. « *Longtemps, ces particules ont été hypothétiques, à tel point qu'on aurait pu considérer qu'elles faisaient elles aussi partie du secteur sombre,* rappelle Matheus Hostert, théoricien à l'institut Perimeter, au Canada. *Elles n'interagissent qu'à travers l'interaction faible et la gravitation, ce qui les rend assez difficiles à détecter.* » Aujourd'hui parfaitement intégrés au modèle standard, les neutrinos ont été observés maintes et maintes fois, opérant leurs métamorphoses : ils peuvent prendre trois saveurs, et donc trois masses différentes – du plus léger au plus lourd : électronique, muonique et tauique –, et ont la capacité d'osciller entre les unes et les autres. Mais ils restent encore enveloppés d'un voile de mystère. « *La théorie prévoit qu'ils n'ont aucune masse, mais l'expérience nous montre qu'ils en ont bien une, extrêmement faible,* » signale Carlos Argüelles-Delgado. Et plusieurs expériences qui ont observé leur oscillation, comme celle MiniBooNE, menée en 2018 aux États-Unis, détectent

systématiquement un surplus inexplicable de neutrinos électroniques par rapport à ce que prévoit la théorie... Les physiciens ont alors remarqué que ces deux problèmes pouvaient être résolus en intégrant un quatrième type de neutrino, dit stérile, qui influencerait l'oscillation des autres et leur octroierait en quelque sorte leur masse. Mais après des années de recherches infructueuses, le paradigme du neutrino stérile a été petit à petit abandonné au profit d'un nouveau cadre, plus complexe mais plus prometteur : celui des neutrinos sombres. Ils interagiraient par la force faible, celle qui régit les désintégrations nucléaires, et « *résoudraient ces problèmes intrinsèques à la famille des neutrinos,* » décrit Carlos Argüelles-Delgado. En 2021, le chercheur et ses collègues se sont appuyés sur les observations de MiniBooNE et celles de l'expérience IceCube, qui traque les neutrinos en Antarctique, pour mettre au point un modèle avec trois neutrinos sombres qui pourrait, en prime, résoudre d'autres problèmes internes à la physique, comme le gigantesque surplus de matière par rapport à l'antimatière dans l'Univers. Et lui aussi pourrait incarner la matière noire... Si furtifs soient-ils, les neutrinos sombres déploient un pouvoir sans limite.

**MASSE**  
Environ 400 MeV,  
1000 fois plus  
lourd qu'un  
électron

**FAMILLE**  
Leptons, comme  
les électrons

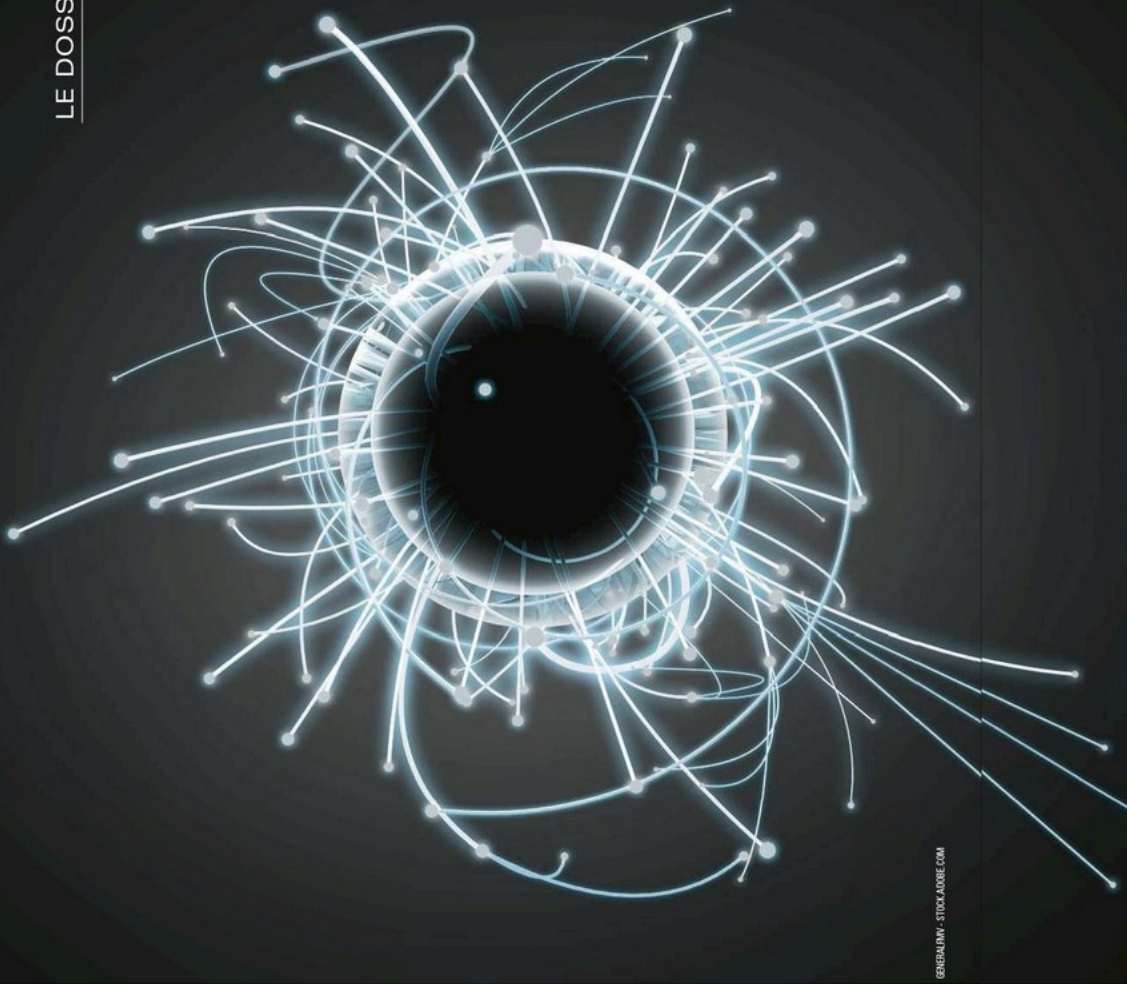
**SIGNE  
PARTICULIER**  
Capable  
d'influencer  
l'oscillation des  
neutrinos  
classiques

**INVENTION**  
En 2005, par  
Takahiko Asaka,  
université de  
Rigata, et Mikhail  
Shaposhnikov,  
École polytechnique  
fédérale  
de Lausanne



SHUTTERSTOCK





GENERAL/PAW - ISTOCK/ADGEE.COM

# HIGGS SOMBRE

## L'IMPULSION QUI MANQUE À L'UNIVERS

« Nous avons découvert qu'il existe de nombreuses raisons théoriques de s'attendre à la présence d'un boson de Higgs supplémentaire dans le secteur obscur », conclut Christian Schwabenberger, responsable scientifique de DESY, l'accélérateur de particules allemand. Il emprunterait l'espace d'un champ invisible qui donnerait leur masse à toutes les particules du secteur sombre. Le Higgs sombre serait l'équivalent du célèbre boson de Higgs, dernier membre du modèle standard à avoir été détecté, en 2012 au LHC – qui confère leur masse à toutes les particules de notre monde. L'idée de cette version obscure de la star des particules est apparue il y a une trentaine d'années, peu après les premières réflexions autour du secteur sombre, et n'a cessé depuis de s'amplifier. Il faut dire qu'elle découle naturellement de plusieurs théories explorant la physique au-delà du modèle standard, comme la supersymétrie, qui imagine des partenaires. « Ce n'est pas la seule solution pour conférer une masse à ces particules, mais c'est certainement la plus simple », affirme catégoriquement Luc Darmé, MSCA fellow du programme européen Horizon 2020 à l'université de Lyon. Et ce champ sombre aurait un impact majeur sur l'Univers : il pourrait avoir donné naissance aux

autres particules sombres au début de l'Univers; par ses couplages avec elles, il fournirait la matière noire manquante; il aurait même pu initier cette fulgurante période durant laquelle l'Univers s'est brusquement étendu, juste après le big bang... En prime, étant cousins, les Higgs sombre et lumineux seraient capables de se mélanger, comme le photon et son homologue noir. Le Higgs obscur pourrait momentanément emprunter les interactions du Higgs lumineux, le temps de se désintégrer. Et il serait possible de le détecter en mettant en évidence une apparition spontanée de particules... Reste à établir sa masse : « Il pourrait être plus massif que le Higgs classique, mais dans ce cas, il serait présent dans des proportions assez petites. Et indétectable avec les moyens actuels, raisonne Luc Darmé. Ou bien, il pourrait être plus léger et accessible. C'est plutôt cette dernière solution qui est privilégiée aujourd'hui. » Le Higgs sombre n'en resterait pas moins extrêmement discret, n'interagissant que très peu avec les particules classiques et à travers des forces qui restent peut-être encore à découvrir. L'expérience FASER, qui démarre au LHC pour le détecter, pourrait permettre de trancher entre les deux options.

**MASSE**  
Probablement inférieure à 10 GeV, soit 10 protons

**FAMILLE**  
Boson scalaire, comme le boson de Higgs

**SIGNE PARTICULIER**  
Confère leur masse aux particules du secteur sombre

**INVENTION**  
Mentionné pour la première fois en 1993 par Rohini Godbole, Institut des sciences de Bangalore

# AXION

## UNE FOULE DE MINUSCULES PARTICULES

**MASSE**  
 $10^{-4}$  à  $10^{-22}$  eV,  
 c'est minuscule

**FAMILLE**  
 Boson scalaire,  
 comme le boson  
 de Higgs

**SIGNE PARTICULIER**  
 Aurait été  
 produit dans des  
 proportions  
 extraordinaires  
 au cours du  
 big bang

**INVENTION**  
 En 1977, par  
 Helen Quinn et  
 Roberto Peccei,  
 université  
 Stanford

Ce sont des particules extrêmement légères, plusieurs centaines de milliers de milliards de fois plus que le plus léger des neutrinos. « Au départ, les théoriciens les ont conçues dans le but de résoudre un grand problème du modèle standard, lié à l'interaction forte, qui assure la cohésion des neutrons et des protons au sein des noyaux atomiques », retrace Sébastien Descotes-Genon, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie. Car sur le papier, cette force est censée générer un très faible champ électrique dans le noyau des atomes... qu'aucune expérience n'a encore jamais réussi à mettre en évidence. L'axion viendrait miraculeusement « nettoyer ce problème » – d'où son nom, emprunté à une marque de lessive. Emplissant l'espace sous la forme d'un champ, à la manière du boson de Higgs, il s'opposerait à l'interaction forte et viendrait annihiler complètement ce champ électrique. Or depuis, les physiciens ont découvert que l'axion a beaucoup d'autres atouts. En étendant juste un peu le modèle, ils ont montré qu'il serait susceptible de compter pour une part très importante de la matière noire dans l'Univers: les axions collent parfaitement avec le portrait chinois dressé par les expériences pour cette matière inconnue – très faible masse, non chargés,

très stables et assez lents. « Qui plus est, nous avons trouvé des mécanismes qui prédisent que des axions dits cosmologiques auraient été produits dans des proportions absolument titanesques juste après le big bang, en même temps que les particules classiques », précise Matheus Hostert, de l'institut Perimeter, au Canada. Une équipe menée par l'astrophysicien David Marsh, de l'université de Göttingen, a même dressé en février dernier le portrait d'étoiles faites d'axions. « Les plus grosses seraient instables et se désintégreraient en photons qui chaufferaient le milieu intergalactique », décrit-il. Et depuis quelques années, les théoriciens avancent que plusieurs anomalies détectées dans les expériences de physique des particules pourraient s'expliquer grâce à lui, comme celle du détecteur Xenon. Sans compter ce sursaut gamma repéré en octobre 2022 dans l'espace, le plus long et le plus lumineux jamais observé: cette bouffée de particules contenait un photon de très haute énergie qui ne devait pas s'y trouver. Il aurait dû interagir avec d'autres particules et perdre de l'énergie avant d'atteindre la Terre... À moins qu'il n'ait été converti en axion le temps de traverser l'espace, avant de se métamorphoser de nouveau! Les axions s'insinuent partout dans l'Univers.

GETTY IMAGES



# AU CŒUR DES TÉNÉBRES

«Les mesures ont commencé en juillet 2022, tout fonctionne bien», sourit Jonathan Feng, physicien à l'université de Californie et membre de l'expérience FASER. «Nous venons d'analyser notre première prise de données recueillies entre 2020 et 2022, témoigne Manfred Lindner, physicien à l'Institut Max-Planck et porte-parole de l'expérience XENONnT. Pour l'instant, pas de trace du secteur sombre. Mais ça continue...» «Nous avons balayé de 0,65 à 0,8 gigahertz, à la recherche d'un excès de puissance provenant de photons engendrés par des axions, ce qui nous a permis d'exclure ceux pesant entre 187 milliards de fois et 151 milliards de fois moins que l'électron... Mais ce n'est que le début. Nous allons sonder des gammes de masses plus grandes», décrit Gray Rybka, porte-parole de l'expérience ADMX, à l'université de Washington.

## NOUVELLES CATHÉDRALES

Partout, la traque est lancée. Photon noir, Higgs et neutrino sombres, axion: les quatre représentants les plus tangibles du secteur sombre font l'objet d'une recherche méthodique. Pour les dénicher, les physiciens mobilisent des détecteurs cachés à des centaines de mètres de profondeur sous les montagnes, dérivent les faisceaux

des plus puissants accélérateurs de particules, concentrent des tonnes d'eau ultra-pure, d'argon, de xénon dans des cuves tapissées de photomultiplicateurs... Ils vont jusqu'à creuser la glace du pôle Sud – 86 forages sur 1 km<sup>2</sup>, pour y tendre un réseau de plus de 5000 capteurs optiques ultrasensibles: c'est le détecteur IceCube.

Bienvenue dans la Big Science! Celle qui investit les mines souterraines désaffectées pour y installer des cathédrales de tuyaux d'hélium liquide, de fibres optiques, d'aimants supraconducteurs; celle qui rassemble des communautés de plusieurs centaines de chercheurs au chevet d'un unique instrument, ultra-sensible et incroyablement complexe.

**Si ces particules interagissent avec les nôtres, même très peu, alors on peut les détecter**

Au-delà du gigantisme, le principe de ces machines à explorer la matière est toujours le même – et assez simple, finalement. «En gros, pour découvrir de nouvelles particules, il y a deux méthodes, résume Manfred Lindner. La détection directe:



À l'expérience Icarus du Fermilab, aux États-Unis

capter avec des détecteurs l'interaction d'une nouvelle particule – généralement, ce sont de grosses expériences placées sous terre pour limiter le bruit. Et la production dans les accélérateurs: entrechoquer des particules connues à haute énergie, pour en trouver de nouvelles dans leurs déchets.»

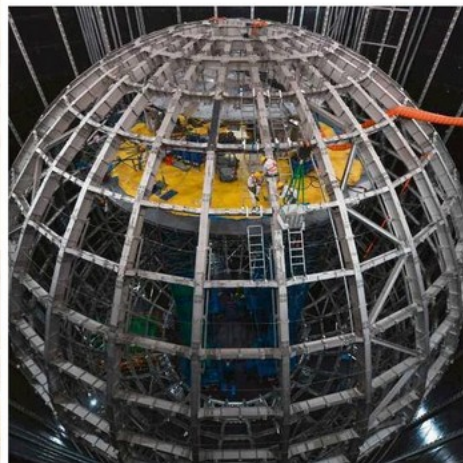
La seconde option a longtemps été favorisée. Il faut dire que cette méthode brutale a largement fait ses preuves: c'est ainsi qu'on a vu surgir progressivement toutes les particules du modèle standard, à partir des années 1970, et la construction de grands collisionneurs – avec le paroxystique LHC du CERN. Depuis son lancement, le LHC a permis de monter très haut en énergie, jusqu'à 13,6 téraélectronvolts: de quoi produire – et découvrir – des particules près de cent fois plus lourdes que le quark top, la plus massive du

modèle standard. Et rien... Certes, la suite est prévue: le Future Circular Collider (FCC), un collisionneur de particules dix fois plus puissant que lui, est en discussion au CERN. Les études sont en cours, en particulier les recherches de financements et sur la faisabilité technique de ce tunnel colossal de 97 km de long (le LHC en fait 27). La décision ferme de lancer, ou non, l'euro-ne s'annonce pas avant 2028, pour une ouverture en 2045 minimum. La Chine travaille sur un projet similaire, avec les mêmes échéances. Bref, pour explorer le régime des masses élevées, il va falloir patienter... «C'est à peu près certain qu'il existe d'autres particules de masse très élevée, qui forment la véritable physique au-delà du modèle standard. Mais en attendant d'explorer ce secteur, autant se replonger minutieusement dans les masses faibles, pour

voir si l'on a pu manquer quelque chose», pose Yann Mambrini, physicien au Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie. Beaucoup de ses confrères partagent son pragmatisme. D'où l'engouement pour le photon noir. D'où l'attrait du boson de Higgs et du neutrino sombres, de l'axion...

## VRAIE FRÉNÉSIE

Car ces masses faibles, ces interactions extrêmement ténues, c'est le secteur sombre. Des particules si discrètes qu'elles auraient bien pu passer sous le radar des instruments de mesure actuels. «C'est véritablement dans leur interaction infime avec nos particules que se situe l'intérêt croissant pour ce domaine de l'ombre», note Anthony Thomas, de l'université d'Adélaïde, en Australie. Si ces particules existent et qu'elles interagissent, même très peu, avec les nôtres, alors c'est une évidence:



À Détecteur de neutrinos JUNO, en construction en Chine

nous pouvons les détecter.» C'est ainsi que s'est développée au CERN, l'année dernière, une petite cible nommée FASER, loin des majestueuses expériences CMS et Atlas, qui exploitent toute la puissance du faisceau principal. «Nous sommes situés 480 mètres en aval du détecteur Atlas, décrit Jonathan Feng. C'est une position idéale pour détecter les particules légères interagissant faiblement, comme le boson de Higgs sombre, par exemple.» C'est aussi dans cette optique que s'est construite, dès 2016, l'expérience NA64, qui récupère les électrons accélérés dans un circuit secondaire, l'un des tunnels circulaires de 7 km qui alimentent le LHC. «Notre cible reçoit ces électrons», décrit Paolo Crivelli, membre de l'expérience au CERN. Ils atteignent des énergies bien plus faibles que les protons du LHC, de 100 à 150 GeV seulement. Nous n'avons donc pas accès à des





**ADMX**  
En cours depuis 2010  
Cavité micro-ondes

**SBND**  
En construction, premières mesures été 2023  
Profondeur: 110 m  
Cuve de 112 tonnes d'argon installée sur la trajectoire de l'accélérateur de particules du Fermilab

**ICARUS**  
En cours depuis 2020  
Cuve de 700 tonnes d'argon, installée sur la trajectoire d'un faisceau de neutrinos

**LUX-ZEPLIN**  
En cours depuis 2021  
Profondeur: 1 500 m  
Cuve de 7 tonnes de xénon liquide

**MICROBOONE**  
En cours depuis 2015  
Cuve de 170 tonnes d'argon, installée sur la trajectoire d'un faisceau de neutrinos

**DEAP-3600**  
En cours depuis 2016  
Profondeur: 2 000 m  
Cuve de 3,6 tonnes d'argon

**ICECUBE**  
En cours depuis 2011 | Profondeur: 2 500 m  
Réseau de détecteurs d'1 km<sup>2</sup> enfoui dans la glace

**HYPER-KAMIOKANDE**  
En construction, premières mesures 2027  
Cuve de 260 000 tonnes d'eau ultra-pure

**PANDAX-4T**  
En cours depuis 2020  
Profondeur: 2 400 m  
Cuve de 4 tonnes de xénon

**FASER**  
En cours depuis 2022  
Profondeur: 100 m  
Détecteur installé au CERN, sur la trajectoire du LHC

**EDELWEISS-SUBGEV**  
En construction  
Profondeur: 1 700 m  
Réseau de cristaux de germanium

**XENONNT**  
En cours depuis 2020  
Profondeur: 1 500 m  
Cuve de 8 tonnes de xénon

**SABRE**  
En construction, premières mesures fin 2023  
Profondeur: 1 500 m  
Réseau de cristaux d'iode de sodium dopé au thallium

**SUPER-KAMIOKANDE**  
En cours depuis 2020  
Profondeur: 1 800 m  
Cuve de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure

**ALPS-II**  
En construction, premières mesures en 2023  
Profondeur: 30 m  
Cavités optiques de 120 m de long branchées sur un laser

**NA64**  
En cours depuis 2016  
Profondeur: 100 m  
Détecteur installé au CERN, sur la trajectoire de l'accélérateur SPS

**DAMA/LIBRA**  
En cours depuis 2011  
Profondeur: 1 500 m  
Réseau de cristaux d'iode de sodium dopé au thallium

**PADME**  
En cours depuis 2018  
Détecteur installé sur la trajectoire de l'accélérateur d'électrons et de positrons de l'institut de physique de Frascati (Italie)

## 18 expériences dans le monde entier espèrent faire la lumière sur le secteur sombre

particules lourdes, mais à des particules très discrètes, celles du secteur sombre, en particulier le Higgs sombre et le photon noir.» Ou encore l'expérience ALPS, qui profite des infrastructures de l'ancien accélérateur de particules HERA, au centre DESY – l'équivalent allemand du CERN. L'expérience PADME, en Italie: «Nous sommes branchés sur le faisceau DAFNE, une ligne de transfert de faisceau d'électrons et de positrons...», situe Jim Alexander, physicien à l'université Cornell, qui participe à l'expérience.

«Ces expériences attirent de plus en plus l'attention des chercheurs, observe Manfred Lindner. L'idée est d'accumuler des données sur des années, pour voir

finement des phénomènes statistiquement très rares, comme la transformation d'un axion en photon... ou au contraire, exclusion de régimes de masse.»

### RESSERRER L'ÉTAU

Les physiciens détournent aussi des expériences déjà lancées, en particulier celles dédiées à la détection du fameux wimp ou à l'étude des oscillations des neutrinos. Ils

trouvent des vallées encore inexplorées: des zones de paramètres qui pourraient être peuplées de particules sombres. «On se rend compte de l'étendue de ces vastes territoires chez ces particules de masse modeste, et pourtant accessibles avec certaines expériences actuelles», témoigne le théoricien Luc Darmé, MSCA fellow du programme européen Horizon 2020 à l'université de Lyon.

Ainsi, en analysant les résultats de l'expérience PANDAX-4T, menée dans le laboratoire souterrain des montagnes du Sichuan, en Chine, les physiciens ont pu établir il y a quelques mois la contrainte la plus stricte sur le taux d'interaction des wimps avec les noyaux atomiques – ils ne peuvent faire plus de 40 GeV – et, en creux, délimiter plus précisément l'espace du secteur sombre. «Nous procédons de la même ma-

nière avec XENONnT, nous balayons l'espace des paramètres, nous définissons les intervalles de masse où il n'y a rien, nous resserrons l'étau», décrit Manfred Lindner. C'est le cas aussi de l'expérience ADMX, installée à l'université de Washington. «Nous n'avons pas attrapé d'axion, mais nous avons pu exclure une bande de masses possibles quatre fois plus grande. Nous continuons de balayer les endroits

où ils sont le plus susceptibles de se cacher», décrit Gray Rybka. Nous sommes en train d'atteindre les masses que les théoriciens jugent le plus plausibles.»

Nous les avons recensées, elles sont dix-huit: dix-huit expériences qui mènent en ce moment l'exploration du secteur sombre. Aucune n'a encore frémé sous l'effet d'une particule obscure. Mais au CERN, au San Grasso en Italie, au Fermilab dans l'Illinois, au DESY à Hambourg, dans le laboratoire souterrain de Modane, dans la mine de Mozumi au Japon, dans les sous-sols de Stanford, les physiciens ont basculé du côté obscur.

### Pour aller encore plus loin

#### Une conférence

**Ebourifant.** Le physicien James Beacham explique le photon noir lors d'une conférence TED: «Dark Photons at Noon», <https://www.youtube.com/watch?v=BQ0z6V0Z1zc>

#### Un livre

**Nourrissant.** Un ouvrage de vulgarisation complet sans être indigeste. *À la recherche de l'Univers invisible*, de David Elbaz (Odile Jacob, 2016).

#### Des publications

**Structurant.** Pour faire le point sur les portes du secteur sombre: «Dark Photon Limits: A Handbook», A. Caputo et al. (2021); «Light Dark Sectors through the Fermion Portal», L. Darmé et al. (2020); «Dark Neutrino Portal to Explain MiniBooNE Excess» E. Bertuzzo et al. (2018); «Axiogenesis», R. Co et al. (2020).







# LA SOLUTION BIOCHAR

**COMMENT UNE TECHNIQUE ANCESTRALE PROMET DE STOCKER LE CARBONE, DE FERTILISER LES SOLS, DE LES DÉPOLLUER, DE FILTRER L'EAU, DE SERVIR DE COMPLÉMENT ALIMENTAIRE, DE FABRIQUER DU BÉTON, DU BIOPLASTIQUE...**

PAR JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

**L'**engouement est réel», confirme le chercheur français David Houben, spécialiste du biochar à l'Institut polytechnique UniLaSalle de Beauvais. «*La filière commence même à se développer en France, où le biochar a longtemps été boudé*», ajoute sa collègue du CNRS Cornelia Rumpel, pionnière des recherches dans l'Hexagone sur le sujet.

Soler, groupe SLB, CarbonLoop, Charwood Energy, NetZero, Suez-Veolia, Haffner Energy, GazoTech, Terra Fertilis, Bleuvert: beaucoup de start-up et d'industriels français se lancent à l'assaut de ce marché mondial dominé par la Chine et les États-Unis. Un marché avec une croissance annuelle à deux chiffres.

Signe d'un changement de braquet: début février, au salon international Bio360 dédié à la bioénergie et à la bioéconomie organisé à Nantes, «*le biochar était partout*», atteste Jacques Bernard, de l'association Aile, qui organise dans la foulée, le 29 mars à Rennes, les premières Assises nationales des biochars: «*Notre objectif, annonce-t-il, est de réunir les acteurs du domaine et les scientifiques pour réfléchir à la façon dont le biochar peut trouver sa place en France.*»

GETTY IMAGES



## LE VRAI DÉFI EST ÉCONOMIQUE

Il faut dire que ses promesses impressionnantes : ce « biocharbon » pourrait améliorer les rendements agricoles, jusqu'à plus de 40% dans les régions tropicales, tout en créant un important puits de carbone, capable, dans certains scénarios, de compenser 5% des émissions mondiales de gaz à effet de serre par an. « *La première fois que j'ai entendu parler du biochar, j'ai eu le sentiment que c'était trop beau pour être vrai* », confie la chercheuse australienne Annette Cowie, du NSW Department of Primary Industries, qui ne doute plus aujourd'hui de ses qualités.

### PLUS DE 2000 ANS...

Mais de quoi ce produit miracle est-il donc le nom? C'est d'abord un mot-valise pour désigner tout simplement le bon vieux « charbon végétal ». Autrement dit, n'importe quelle partie d'une plante (branches, paille, touffes d'herbe...) réduite à l'état de charbon après avoir été chauffée entre 200 et 800°C, sans oxygène pour éviter qu'elle ne s'enflamme. « *Comme autrefois dans les meules des charbonniers* », souligne David Houben. Aujourd'hui, les pyrolyseurs dernier cri, vendus parfois plus d'un million d'euros pièce, revendiquent des gains substantiels de rendement: « *Avec la pyrolyse, près de 30% de la biomasse sont convertis en charbon capable de concentrer jusqu'à 80% de carbone* », détaille le biogéochimiste et expert du biochar Samuel Abiven, à l'École normale supérieure de Paris. Qui ajoute en souriant: « *Mon arrière-grand-père utilisait déjà du charbon végétal comme fertilisant.* »

La première publication scientifique à son sujet daterait d'ailleurs du XVIII<sup>e</sup> siècle, estime le chercheur: « *L'auteur y évoque ses bienfaits sur la vigne dans le Beaujolais.* » Mais ce sont surtout, au début du XXI<sup>e</sup> siècle, les études scientifiques sur la fertilité des légendaires *terra preta* d'Amazonie, les « terres noires » en portugais, qui ont marqué les esprits – la quantification de certains minéraux comme le phosphate y est parfois multipliée par 500. Les derniers

Pour l'instant, le biochar reste un produit de luxe: « *Le prix dépasse souvent 1000 euros la tonne* », confirme le chercheur Hans-Peter Schmidt, de l'Institut Ithaka en Suisse. Et il faut au minimum 2 à 5 tonnes par hectare pour escompter un gain sur les cultures. Plusieurs études estiment que ce ne sera rentable que si le cours du crédit carbone grimpe à 110 euros, et que le prix de la tonne s'établit autour de 350 euros. On en est encore loin.

travaux d'Umberto Lombardo, de l'université indépendante de Barcelone, ont d'ailleurs renforcé l'hypothèse que cet « or noir » amazonien est bien d'origine humaine, et ce dès 500 av. J.-C. « *On trouve d'autres formes de terres noires en Afrique* », ajoute ce géo-archéologue. Ce qui permet de s'assurer que ce carbone végétal minéralisé par nos ancêtres demeure durablement piégé dans le sol. « *La durée exacte est encore difficile à établir, mais cela pourrait tourner autour de cent ans en moyenne* », résume le climatologue Philippe Ciais, du Commissariat à l'énergie atomique, qui a contribué à prouver que le biochar est bien une technologie à émissions négatives. « *C'est même la seule qui tienne la route* », abonde la chercheuse Claudia Kammann, de l'université Hochschule Geisenheim, en Allemagne.

Les toutes dernières analyses du cycle de vie complet du biochar – qui va de la mise en culture des plantes jusqu'à l'enfouissement de leur charbon résiduel dans le sol en passant par leur pyrolyse – permettent d'établir qu'une tonne de biochar pourrait

séquestrer l'équivalent de 2 à 3 tonnes de CO<sub>2</sub>. Logiquement, le GIEC en plébiscite l'usage. Et c'est l'une des raisons de l'engouement des start-up et des industriels: une tonne de biochar peut en effet donner droit à au moins deux crédits carbone. Or, vu que le cours dudit crédit carbone s'est envolé fin 2022 en Europe au-dessus des 100 euros la tonne, la commercialisation du biochar pourrait enfin devenir rentable.

Au risque de créer des tensions sur les marchés agricoles? « *Il serait regrettable de planter des arbres ou d'utiliser des champs entiers pour produire du biochar aux dépens d'autres besoins* », prévient Comelia Rumpel. Et il pourrait aussi être victime de son propre succès: « *On est en train de produire du biochar avant même de songer à son utilisation* », déplore David Houben. « *Attention à ne pas en faire une panacée*, avertit son collègue australien Balwant Singh, de l'université de Sydney, expert mondial du biochar, car la science est formelle là-dessus: ce n'est pas une solution générale. » Maintenant que les chercheurs reconnaissent qu'ils disposent d'assez de connaissances pour guider l'usage du biochar, tous préconisent en effet des solutions « sur mesure ».

### MÊME UN SNOWBOARD

Car il n'y a pas « un biochar, mais des biochars », rappelle Jacques Bernard. Ses propriétés physico-chimiques et ses effets dépendent fortement de la biomasse utilisée: « *Le biochar issu du bois est plus durable et absorbe davantage l'eau que les autres* », compare Annette Cowie. De plus, selon le type de pyrolyse et sa température, le biochar sera plus ou moins alcalin, plus ou moins poreux, recouvert de plus ou moins de cendres concentrant des minéraux plus ou moins nutritifs... « *Le choix du type de biochar doit dépendre de l'application et des objectifs souhaités* », résume David Houben. « *Utiliser le mauvais biochar peut être contre-productif* », insiste Annette Cowie.

Sa production a été multipliée par **30** en Europe depuis 10 ans.

Il pourrait remplir jusqu'à **33%**

de l'objectif de captation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, fixé par le GIEC pour le siècle à venir.

**55** applications différentes sont envisagées.

Surtout, ses bienfaits pour l'agriculture sont en grande partie liés à sa capacité à rendre les sols moins acides, ainsi qu'à ses innombrables microcavités qui lui donneraient presque des alures d'éponge noire. Celles-ci sont autant de refuges pour les micro-organismes du sol et autant de galeries pour retenir l'eau. Le biochar n'apporte donc de gain substantiel qu'aux sols acides, secs et granuleux, que l'on trouve en majorité sous les tropiques. Là, estime Claudia Kammann, dans une étude publiée fin 2022, quelques tonnes de biochar à l'hectare pourraient conduire à une augmentation de plus de 15% des rendements, ce qui permettrait aux fermiers de produire localement leur biochar sans rogner sur leurs revenus ni étendre leur surface agricole.

En revanche, dans les zones tempérées où les systèmes agricoles sont déjà poussés au maximum, comme en France, l'effet du biochar sur les rendements sera marginal. « *Le biochar trouvera difficilement une place dans l'agriculture européenne* », anticipe l'un des pionniers du domaine, le chercheur Hans-Peter Schmidt, de l'Institut Ithaka, en Suisse. « *Peut-être pour des cultures à forte valeur ajoutée, comme le maraîchage* », nuance David Houben, qui voit également des débouchés dans les espaces verts des villes. « *L'utilisation pour stabiliser les métaux dans les sols des friches industrielles est aussi prometteuse* », ajoute son collègue Frédéric Rees, de l'Institut national de la recherche agronomique. « *Il y a d'autres applications possibles, estime Hans-Peter Schmidt, notamment l'ajout de biochar dans des bétons, dans l'alimentation animale, comme catalyseurs pour produire des biocarburants, ou dans des écomatériaux à l'image de la planche de snowboard avec laquelle Maurizio Bormolini est devenu champion du monde...* » Le chercheur entrevoyait il y a dix ans cinquante-cinq débouchés possibles au biochar. « *Si la moitié de ces applications marche, ce sera déjà très bien* », considère Samuel Abiven.

Une étude publiée en ce début d'année dessine l'ampleur de l'enjeu: si la filière mondiale parvenait déjà à traiter 10% des 5 milliards de tonnes de déchets végétaux produits chaque année dans le monde, dont les trois quarts en Asie, alors le biochar capturerait au moins 2,5 gigatonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit le quart de l'objectif de séquestration du carbone fixé par le GIEC pour limiter le réchauffement à 2°C d'ici à 2100. Ce qui serait absolument considérable. Si la hausse des crédits carbone se poursuit, il est donc probable que l'on entende de plus en plus parler du biochar.

### NOS SOURCES

Liuwei Wang et al., *Carbon Research* (2023); Constanze Wenner et al., *Earth's Future* (2022); Stephen Joseph et al., *GCB-Bioenergy* (2021); Hans-Peter Schmidt et al., *GCB-Bioenergy* (2021). Retrouvez toutes nos sources sur [epsilon.com/sources](https://www.epslon.com/sources). Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilon*.





Grâce à l'IA, les éthologues commencent à saisir le sens du chant des baleines, des cris des cochons, des aboiements des chiens...

# LE GOOGLE TRANSLATE DES ANIMAUX

PAR VINCENT NOUYRICAT

GETTY IMAGES



l'origine, ce n'était qu'une bonne blague. Le 1<sup>er</sup> avril 2010, de facétieux ingénieurs de Google annonçaient le lancement d'une appli révolutionnaire de traduction du langage des chats, chiens, chevaux, poulets, ânes, cochons... Le tout assorti de consignes très précises, comme : « *Assurez-vous que l'animal que vous souhaitez traduire est calme et à l'aise. Vous pouvez le caresser en approchant le combiné de sa bouche.* » Tellement improbable et désopilant ! Sauf que, treize ans plus tard, le projet est devenu tout à fait sérieux. « *On n'a jamais été aussi proche de pouvoir interpréter leur communication* », lâche Olivier Adam, bioacousticien à l'Institut des neurosciences Paris-Saclay.

L'espoir de réaliser ce vieux fantasme s'appuie sur les progrès spectaculaires des algorithmes d'analyse de la musique et de la parole, ainsi que de traduction automatique du langage humain, sans parler des robots conversationnels comme ChatGPT.

#### KRAK, HOK

Ah, le rêve de comprendre ce qui se cache derrière les méprisantes onomatopées « cui-cui », « ouaf-ouaf », « meuh », de ne plus se contenter de quelques bribes rassemblées laborieusement sur le terrain par des biologistes couverts de sueur – les singes mone de Campbell disent « krak » pour signaler l'arrivée d'un léopard, « hok » pour celle d'un aigle... Et de pouvoir enfin s'adresser directement à eux, au-delà de notre complicité avec les



## UNE FRÉNÉSIE DE TRADUCTIONS

animaux de compagnie, de cirque ou de laboratoire. Désormais, beaucoup y croient.

Quelques entrepreneurs audacieux ont déjà lancé leurs applis qui se targuent de traduire – entre nous, très aléatoirement et grossièrement – le chien ou le chat, et des équipes de bioacousticiens armés de nouveaux outils informatiques se lancent dans le déchiffrement. De grandes initiatives ont été lancées dernièrement, comme la Cetacean Translation Initiative, dédiée à la traduction du cachalot, ou le CETI, le Earth Species Project; l'acronyme CETI faisant référence au fameux projet SETI de recherche d'intelligence extraterrestre. Des programmes excitants qui attirent d'anciens informaticiens de Twitter, Facebook, Google, d'éminents cryptographes, de jeunes pousses du MIT, de Harvard, de Berkeley. « *C'est vraiment du haut calibre, ce sont des gens très*

*bons dans le domaine* », siffle François Yvon, spécialiste en traitement du langage au laboratoire interdisciplinaire des sciences du numérique.

On ne va pas se le cacher : le défi reste considérable. Certes, les IA actuelles affichent une compréhension saisissante de la structure du langage humain, au point d'accomplir des traductions sans avoir besoin d'exemples. Mais n'oubliez pas que ces algorithmes ne font qu'établir des correspondances entre deux langues pratiquées par des membres d'une même espèce, dotés des mêmes capacités cognitives, d'une perception similaire de leur environnement, évoluant dans un même contexte. « *Nous parlons tous plus ou moins des mêmes choses à travers le monde, ce qui permet à ces outils probabilistes de retrouver des fréquences de mots*, note François Yvon. *Les baleines, elles, ne parlent pas de la réforme des retraites...* »

GETTY IMAGES

### ÉLÉPHANT

#### L'IA analyse ses barrissements

L'éthologue Joyce Pool a enregistré leurs barrissements, grondements et autres grognements associés à plus de 500 comportements. Appels liés à la présence d'humains ou d'abeilles, à une rencontre, à des protestations face à un congénère qui vous bouscule, dans un bain de boue... « *Nous sommes en train de soumettre ces fichiers à des IA pour plus de précisions* », annonce-t-elle.

### COCHON

#### Il émet des cris plus longs en situation inconfortable

Les bavardages incessants de plus de 400 cochons, suivis de la naissance à leur abattage, viennent d'être passés au filtre des algorithmes : « *Nous avons pu différencier leurs cris émis dans 19 situations émotionnelles différentes* », se félicite Élodie Briefer, de l'université de Copenhague. Et une règle semble se dégager : plus le contexte est négatif, plus le cri est long.

### CHAUVE-SOURIS

#### Des informations sur le contexte du moment

Le décortiquage de plus de 15000 cris de roussettes d'Égypte commence à porter ses fruits : « *Nous n'avons pas encore réussi à traduire le sens de chacun de ces appels, mais nous avons pu démontrer que ces vocalisations délivraient des informations sur le contexte du moment* – alimentation, repos, agression, etc. » signale Yosef Prat, de l'université de Neuchâtel.

### CHIMPANZÉ

#### De mystérieuses séquences de vocalises

Le récent décryptage des vocalisations de 46 chimpanzés adultes, évoluant en Côte d'Ivoire, a permis de mettre au jour 12 types de cris simples, combinés en 390 séquences vocales – les plus complexes étant formées par 10 cris. « *On commence à avoir une idée de la signification probable de certains cris, mais nous n'avons pas encore saisi le sens de ces combinaisons* », reconnaît Cédric Girard-Buttoz, de l'Institut Max-Planck.



## CACHALOT

Il utilise une sorte de code Morse

Les chercheurs du projet CETI ont rassemblé une base de données d'environ 100 000 clics de cachalots : ces signaux plus ou moins espacés ressemblent à un code Morse, qui peut durer de quelques secondes à une demi-heure. Les algorithmes actuels parviennent déjà à identifier la signature individuelle des cétacés et leur appartenance à tel ou tel clan. Ce n'est que le début.

## CHAT

Une appli traduit déjà ses états d'âme

Pour cette espèce, une appli baptisée MeowTalk propose déjà des traductions... « Il y a beaucoup de marketing ici, mais nos algorithmes sont capables de détecter dans la structure des vocalisations leur état émotionnel », relate Stavros Ntalampiras, de l'université de Milan. L'IA discerne parfaitement si le félin réclame de la nourriture ou s'il est en train de se faire brosser.



# DEPUIS 2 ANS, L'IA RÉVOLUTIONNE LE DOMAINE

Chaque espèce vit dans son propre univers et il semble presque impossible de savoir ce que cela fait d'être une chauve-souris, un cachalot ou un rat-taupe nu. De quoi parlent-ils entre eux? Ont-ils l'équivalent d'une grammaire, utilisent-ils des mots, des combinaisons de sons? « On a beaucoup de mal à déterminer la bonne échelle d'analyse, comment décoder les sons que l'on détecte », confie Nicolas Mathevon, bioacousticien à l'université de Saint-Étienne. Quelle est la plus petite unité d'information? Où commence et où finit un éventuel mot, prononcé qui plus est de manière différente d'un individu à l'autre? Et on ne vous parle même pas des dialectes des multiples clans au sein d'une même espèce...

Pour casser ces codes secrets infernaux, il va falloir compter sur d'immenses bases de données. « *Le machine learning devrait ensuite pouvoir les analyser pour extraire les motifs cachés dans l'amplitude du signal acoustique, son timbre, sa durée, son timing, ou une combinaison de plusieurs facteurs* », annonce Dan Stowell, écologue geek à l'université de Tilburg, aux Pays-Bas.

La collecte de sons bruts bat son plein : les chercheurs du CETI installent ce printemps un vaste réseau de microphones au large

de la Dominique pour écouter les cachalots. Les informaticiens mettent aussi au point de nouveaux logiciels pour classer ces signaux. Récemment, le système ORCA-SLANG a ainsi annoté en quelques jours 235 369 appels d'orques issus de plusieurs années d'enregistrements ; un résultat impressionnant, même si les chercheurs estiment qu'il faudra rassembler plusieurs millions d'échantillons pour pouvoir espérer décoder un langage.

### EFFET COCKTAIL PARTY

Lenjeu est aussi de parvenir à suivre les conversations entre individus – chacun respecte en général son tour de parole, mais pas toujours, les sons peuvent se chevaucher. Et les grands rassemblements créent une cacophonie très difficile à analyser : « *L'effet cocktail party est un défi technique pour l'étude*

## RAT-TAUPE NU

Un répertoire étonnamment complexe

Près de 40 000 gazouillis émis par ces étranges mammifères souterrains ont déjà été analysés : « Nos outils de machine learning y ont détecté des informations sur leur identité individuelle et l'appartenance à la colonie », révèle Alison Barker, de l'Institut Max-Planck. Nous n'avons étudié qu'un seul type de cri, mais leur répertoire est étonnamment complexe et nous allons tenter de le déchiffrer. »

des chauves-souris en colonie, qui vivent en plus dans l'obscurité », témoigne Yosef Prat, de l'Institut de biologie de Neuchâtel. Sachant que l'acoustique ne suffira probablement pas à traduire toutes les subtilités du langage animal : il semble important de tenir compte aussi des odeurs émises, du comportement, de la gestuelle ; en parallèle du son, de plus en plus de chercheurs filment les animaux ou les équipent de capteurs de mouvements.

Si tant est que des premières traductions émergent, encore faudra-t-il en vérifier l'exactitude... Bien sûr, les informaticiens ne disposent d'aucun exemple correct et approuvé de traduction du dauphin ou de l'éléphant à l'humain. « *Le seul moyen est de poser la question à l'animal, en lui soumettant le signal pour observer sa réaction* », explique Nicolas Mathevon. Plusieurs informaticiens lancés dans cette quête réfléchissent déjà à générer des cris synthétiques, à l'image de ChatGPT qui produit du texte familier et compréhensible pour les humains. →

## CORBEAU

Il serait capable de produire de la grammaire

Près de 2 000 heures d'enregistrements audio, plus de 10 000 vidéos : « J'ai pu repérer pour la première fois certains types de cri chez le corbeau de Nouvelle-Calédonie, mais nous en sommes aux premières étapes de déchiffrement avec le machine learning », indique Natalie Uomini, du Max-Planck. Ces oiseaux semblent capables de comprendre et produire de la grammaire ! »

## CHIEN

Un langage corporel et des cris très éloquents

La start-up Zoolingua promet de traduire le langage corporel et les sons émis par nos fidèles compagnons – « J'ai envie de faire pipi », « J'ai peur », « J'ai mal », etc. « On commence à avoir des résultats », nous affirme le chercheur Con Slobodchikoff. Et, en labo, plusieurs IA s'entraînent à deviner le contexte des aboiements.



Peut-être le début d'un dialogue inter-espèces assisté par ordinateur...

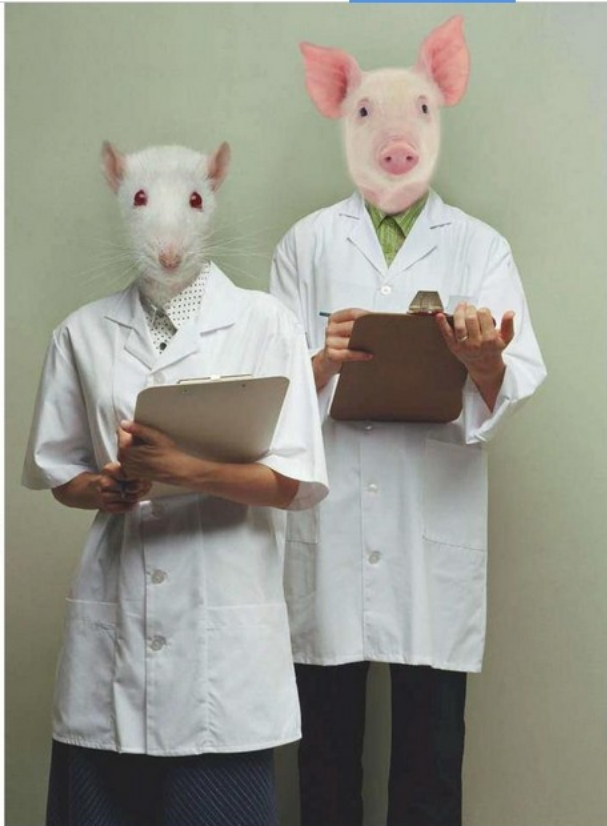
Pour l'instant, les résultats sont embryonnaires. Certains logiciels sont capables d'identifier la signature vocale individuelle de tel ou tel spécimen, d'autres parviennent à associer les cris avec différents contextes – découverte de nourriture, alarme face à un prédateur, défense du territoire, parade nuptiale, début de déplacement, etc. Plusieurs études

## Il faut que ces espèces aient aussi envie de parler avec nous

Natalie Uomini,  
neurologue à l'Institut  
Max-Planck

récentes ont aussi permis de déterminer à partir de leurs cris l'état émotionnel de poulets, de chèvres et de cochons. Et quelques structures grammaticales commencent tout de même à se révéler: «*Nous venons de découvrir une forme de protosyntaxe chez les chimpanzés, qui combinent jusqu'à dix cris dans une même séquence vocale, annonce Cécir Girard-Buttoz, primatologue à l'Institut Max-Planck, en Allemagne. Mais nous ignorons encore la signification de ces séquences, et si cette signification dépend de celle de chaque cri et de leur ordre.*»

Aucun chercheur ne s'attend à ce que l'IA dévoile un langage animal aussi complexe que le nôtre, capable de contenir un nombre illimité de concepts et de combinaisons, susceptible de parler du passé et de l'avenir lointain. «*Pour les primates, on pourra sans doute, à terme, combiner certains des types de cris pour leur communiquer des messages potentiellement complexes... Mais ils ne maîtrisent que le temps présent.*», relève



Cécir Girard-Buttoz. Après tant d'efforts, le dialogue avec certaines espèces pourrait même être très décevant: «*Les ongulés domestiques comme les chèvres, les moutons, les vaches produisent peu de types de cris distincts, qu'ils combinent rarement, souligne Élodie Briefer, biologiste à l'université de Copenhague. Dans leurs vocalisations, il ne semble pas y avoir d'informations sur des événements ou objets extérieurs à l'émetteur, contrairement, par exemple, aux suricates, qui produisent différents cris pour différents prédateurs.*» «*Aucun animal, même un dauphin, ne pratique d'activités coopératives suffisamment complexes pour nécessiter un langage aussi sophistiqué que le nôtre*», tranche Arik Kershenbaum, zoologue à l'université de Cambridge. Même s'il concède que «*certaines espèces seraient peut-être capables de comprendre la grammaire humaine.*»

Naturellement, les animaux ciblés en priorité par les scientifiques sont les plus intelligents, les plus prompts à interagir joyeusement avec les humains – beaucoup d'espèces nous fuient ou nous ignorent –, ceux dont les perceptions sensorielles sont proches des nôtres. Dauphin, baleine, singe, chien... «*Le corbeau de Nouvelle-Calédonie serait aussi un bon candidat, avec son intelligence orientée comme nous vers la fabrication d'outils, estime Natalie Uomini, de l'Institut Max-Planck de géoanthropologie. Je pense que ces corvidés seraient motivés pour nous parler si cela leur était bénéfique. Car c'est l'un des points clés: il faut que les humains et les animaux partagent le même désir et le même intérêt à communiquer les uns avec les autres.*»

### TROP BONS SENTIMENTS

Et si on parvenait à se comprendre? Beaucoup de biologistes nous annoncent vouloir informer leur espèce favorite de la localisation d'une abondante source de nourriture, et surtout les avertir d'éventuels dangers, comme la présence de braconniers ou de filets de pêche. «*Avec notre robot qui reproduit la danse des abeilles, nous pourrions désigner les butineuses des zones où il y a des pesticides*», prévoit Tim Landcraft, roboticien à l'université libre de Berlin. La traduction devrait aussi permettre de mieux comprendre leurs problèmes; les algorithmes de bioacoustique aident déjà à compter rien qu'à la voix le nombre de spécimens présents et

## Nous pourrions éloigner les abeilles des pesticides

Tim Landcraft,  
roboticien à l'université  
libre de Berlin



à évaluer l'état d'un écosystème. «*Au sein des élevages, les outils permettant de déchiffrer les émotions seront très importants pour améliorer le bien-être animal, avance Élodie Briefer. On pourrait aussi générer des vocalisations rassurantes... au lieu d'utiliser de la musique classique, une manière très anthropocentrée de traiter les animaux.*» Plus généralement, «*le simple fait d'avoir accès aux paroles animales, même à un niveau élémentaire, pourrait nous amener à repenser notre rapport au vivant: peut-on vraiment continuer à les tuer pour se nourrir, les mener à l'extinction?*», veut croire Arik Kershenbaum.

## Il y aurait un risque de manipulation des animaux

Nicolas Mathevon,  
bioacousticien à l'université de Saint-Étienne



Mais pénétrer dans l'intimité du monde animal n'est pas sans risque. «*Si l'on comprenait leur code, on pourrait manipuler les animaux à la manière de l'appât du chasseur qui attire le gibier*», souligne Nicolas Mathevon. «*Cela pourrait se transformer en arme pour exploiter ou domestiquer certaines espèces sauvages*», s'inquiète Karen Bakker, à l'université de Colombie-Britannique. Des expériences mal maîtrisées peuvent aussi donner lieu à des incidents, perturbant les animaux ou altérant certaines cultures animales, en introduisant par exemple un nouveau chant qui se propagerait au sein des populations de baleines à bosse du Pacifique. «*Je pense que ce n'est pas éthique de parler avec une baleine*», nous confie une biologiste marine qui souhaite seulement étudier la communication entre cétacés. «*Il y a un risque majeur, nous sommes en train d'étudier les principes de gouvernance et les garde-fous à mettre en place pour que cette technologie soit employée au bénéfice des espèces non-humaines*», réagit Jane Lawton, responsable du Earth Species Project.

Une promesse merveilleuse. Des technologies en plein essor. Une foule de projets. Une attente fébrile du public; de possibles désillusions. Des applications potentielles à la fois salutaires et machiavéliques. A n'en pas douter, le Google Translate des animaux sera l'une des grandes aventures du XXI<sup>e</sup> siècle – sans blague.

### NOS SOURCES

Shafi Goldwasser et al., arXiv(2022); Cécir Girard-Buttoz et al., *Communications Biology*(2022); Jacob Andreas et al., *iScience*(2022). Retrouvez toutes nos sources sur [epsilon.com/sources](http://epsilon.com/sources). Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilon*.





# TOUT EST DANS LE PIED

*Et si c'était lui, la clé du succès de Sapiens... Une merveille d'ingénierie qui nous aurait propulsés sans fatigue à travers tous les continents. Les biomécaniciens ne prennent qu'aujourd'hui la mesure de sa complexité. Et si tout était dans le pied ?*

PAR TITOUAN CORLET

**V**ous ne savez pas à quel point votre pied est une merveille; et d'ailleurs, jusqu'ici, les chercheurs non plus... «*De nouvelles découvertes viennent aujourd'hui bousculer des idées acceptées depuis près d'un demi-siècle*», observe Madhusudhan Venkadesan, ingénieur en biomécanique à Yale. Trois découvertes coup sur coup: une double arche, qui se cachait dans la voûte plantaire! Une capacité de déformation insoupçonnée! Et enfin, le rôle essentiel du talon d'Achille... Avec ses 26 os, ses 16 articulations, ses 107 ligaments et ses 20 muscles, les podologues savaient que le pied est un système complexe, mais pas à ce point. «*Cela nous ouvre de nouvelles portes en médecine, bien sûr, mais aussi en paléanthropologie et même en robotique*», assure Daniel Renjewski, à l'université de Munich.

«*Au début des années 1950, on commençait bien à avoir des théories correctes, mais l'arrivée de l'imagerie médicale a supprimé la réflexion*, analyse Antoine Perrier, podologue et chercheur au sein de l'équipe Bioméca TIMC, près de Grenoble. *On a eu tendance à réduire le pied à son anatomie*



## UNE INCROYABLE MÉCANIQUE À QUATRE TEMPS

structurelle, un peu comme si on essayait de comprendre un moteur simplement en observant chacune de ses pièces. » Il aura fallu attendre le développement d'outils capables d'examiner son fonctionnement directement pendant l'effort, comme le scanner 3D, pour prendre la mesure de sa puissance.

À commencer par le rôle de la voûte plantaire. Telle une clé de voûte en architecture, elle était censée jouer le rôle de point d'appui pour le reste du corps en répartissant de part et d'autre les forces qui entrent par la cheville. Mais non, démontrent en 2020 Madhusudhan Venkadesan et ses collègues. « Toutes les études s'étaient jusque-là concentrées sur son rôle, constate le chercheur. Nous possédons pourtant une deuxième arche, perpendiculaire à la première, vers le milieu du pied, formée par la disposition des os de nos orteils. En inhibant la fonction de cette seconde arche, nous avons pu montrer que la rigidité du pied était divisée par deux. La voûte plantaire, au final, ne compte que pour 25%. »

### FORMIDABLE CATAPULTE

Les biomécaniciens se penchent alors sur la souplesse: en 2021, une équipe de l'université du Queensland, en Australie, montre que la structure du pied peut moduler son niveau de rigidité en fonction de la nature du terrain pour maximiser le transfert de forces. « Le plus impressionnant, c'est qu'il s'agit d'un système presque entièrement passif qui repose seulement sur l'organisation du pied, plutôt qu'un effort musculaire quelconque, admire Antoine Perrier. Le pied a l'extraordinaire capacité de se déformer pour s'adapter à n'importe quel type de terrain tout en étant capable de se rigidifier ensuite pour servir de support à la poussée. »

Enfin, il y a quelques mois, à Munich, Daniel Renjewski et ses collègues mettent au jour le dernier aspect de sa dynamique,

### LE PIED SE DÉFORME EN TOUCHANT LE SOL

Il se pose à plat, ses articulations s'écartent sous le poids du corps, ce qui augmente la surface de contact et fournit un meilleur point d'appui. La tension de la membrane qui connecte l'os du talon à la base des orteils permet au pied de conserver sa cohésion, tandis que le pouce pivote pour s'adapter à la forme du terrain.

celui qui rend la marche si efficace au niveau énergétique. « Lors de chaque foulée, nos pieds passent plus de 70% du temps collés au sol pour mieux maintenir en équilibre. Mais cela ne laisse à nos jambes qu'un bref instant pour être propulsées vers l'avant, ce qui devrait nous coûter beaucoup d'énergie. » À l'aide d'un modèle simplifié, ils ont pu observer les forces qui s'exercent sur le pied avant et pendant le balancement de la jambe. Et constater que le tendon d'Achille est une formidable catapulte: pendant que notre corps joue le rôle de contrepoids en maintenant le pied ancré au sol, il s'étire et accumule de plus en plus d'énergie élastique au fur et à mesure que le corps avance, jusqu'à relâcher l'énergie d'un coup, en propulsant automatiquement la jambe en avant. « Cette astuce permet d'obtenir le balancement de

### IL SE RIGIDIFIE LORS DE LA POUSSÉE

Le pied reste au sol pendant que le tibia avance, le tendon d'Achille tire sur le talon: tous les tendons connectés à cet os sont tirés vers l'arrière. Cela resserre les articulations du pied qui s'emboîtent les unes dans les autres. Le pied devient très rigide, ce qui permet de mieux transférer ensuite la force nécessaire à l'impulsion.

la jambe quasi gratuitement d'un point de vue de la dépense d'énergie », conclut Daniel Renjewski. Qui est en train d'imaginer une nouvelle génération de prothèses orthopédiques: « Avec ce que nous comprenons désormais, il devrait être possible de concevoir des prothèses avec de simples ressorts à la place des moteurs. Elles seraient moins lourdes, consommeraient moins d'énergie et permettraient d'avoir une démarche plus naturelle. »

### SANS SE FATIGUER

Ces nouvelles analyses permettent déjà de concevoir de nouveaux modèles biomécaniques plus précis pour la chirurgie ou la rééducation. Montrant au passage que la structure globale du pied varie largement, au-delà des populations européennes. « La plupart des chaussures que l'on trouve dans

### IL PROPULSE LA JAMBE AUTOMATIQUEMENT

Le tibia continue d'avancer, le pied est toujours ancré, la tension s'accumule dans le tendon d'Achille. Lorsque cette tension dépasse la force qui s'exerce sur le pied, le tendon devient une catapulte: la jambe est propulsée vers l'avant de façon très rapide, mais presque sans effort.

### IL EST PRÊT À RECOMMENCER

Les tissus qui ont pu se trouver tordus pour s'adapter à la forme du terrain se détordent, ce qui réorienter automatiquement dans le sens de la marche les forces transmises à la jambe. Le muscle qui descend à l'avant du tibia se contracte et tire le pied vers le haut: le talon est prêt à absorber le prochain choc.

le commerce ont été conçues autour d'un design générique basé sur cette vision biaisée de la réalité », souligne Antoine Perrier.

Et on commence à mesurer à quel point cette merveille d'ingénierie biologique est sans équivalent sur Terre —chez les autres singes, le pied est trop souple pour leur permettre de marcher sans s'épuiser. « Ces propriétés rendent le pied humain unique parmi les primates, constate Gilles Berillon, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Il lui a permis de se déplacer sur de longues distances sans grande dépense d'énergie. Cela a rendu l'humain bien moins inféodé à un environnement particulier que les autres espèces de primates. Dans le même temps, les mains n'étant plus sollicitées pour la locomotion, elles ont pu être libérées et servir à autre chose. » Et l'humanité s'en est trouvée toute bouleversée.

Et si tout était dans le pied?

### NOS SOURCES

D. Renjewski et al., *Phys. Review* (2022); J. Birch et al., *Journal of Applied Physiology* (2021); Madhusudhan Venkadesan et al., *Nature* (2020). Retrouvez toutes nos sources sur [epsilon.com/sources](http://epsilon.com/sources). Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilon*.





NSA/PT

# EN ROUTE VERS LES LUNES GLACÉES

**L'EXPLORATION DES OCÉANS  
CACHÉS DES SATELLITES DES  
GÉANTES GAZEUSES COMMENCE**

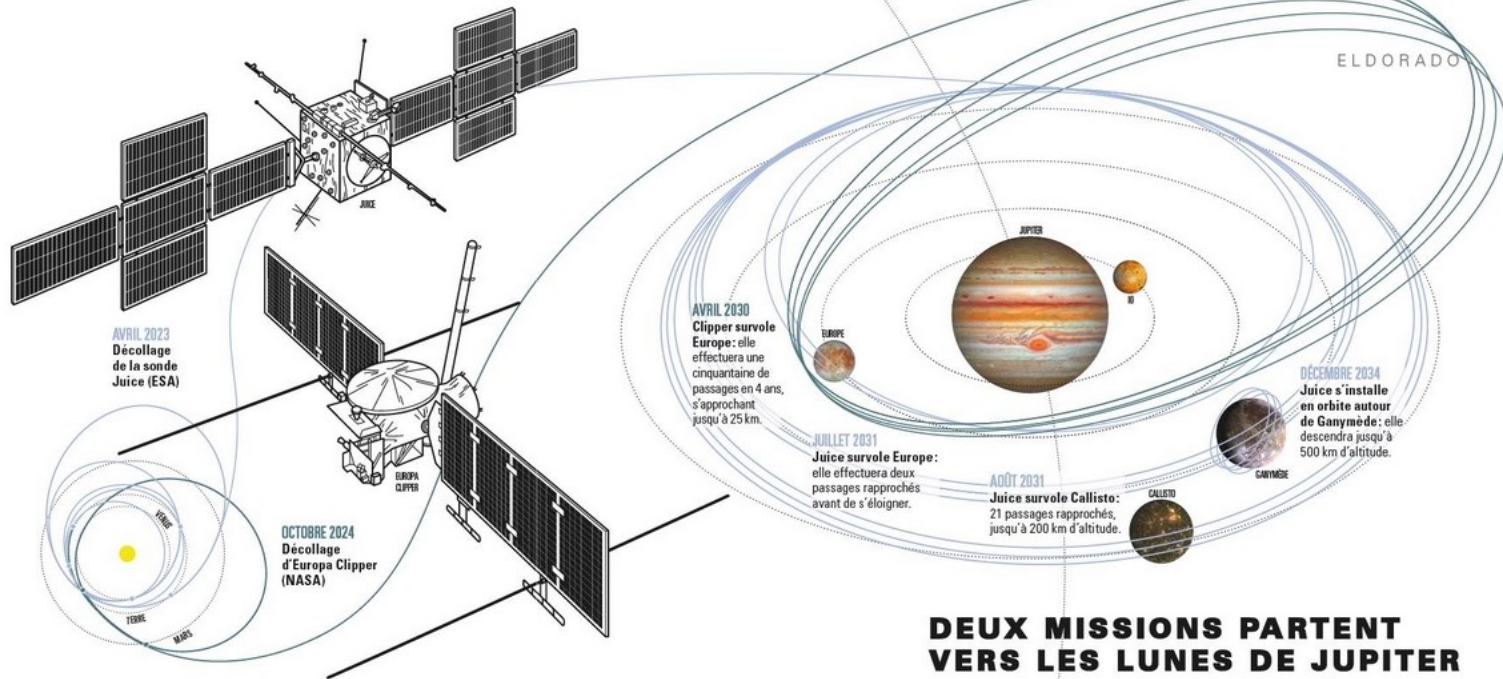
PAR PIERRE HENRIQUET

# P

lus que quelques jours avant le décollage de Juice, l'une des missions les plus ambitieuses de l'Agence spatiale européenne. La sonde, un cube de 5,1 tonnes bardé d'instruments, est en ce moment en train de subir ses dernières vérifications au centre spatial de Kourou, en Guyane, avant d'être placée au sommet du lanceur Ariane 5 qui doit la propulser. Elle prendra la route le 13 avril prochain. Direction Jupiter.

Un périple de près d'un milliard de kilomètres durant lequel elle ne sera pas seule. En octobre 2024, une autre sonde, américaine celle-là, se lancera à ses trousses. Europa Clipper – c'est son nom – filera pour rejoindre Juice. Jusqu'à la devanture : Clipper arrivera à destination en avril 2030, Juice en juillet 2031. Oui, même à une vitesse fulgurante, il faut six ans pour atteindre la géante...

Ou plutôt ses lunes. Car ce ne sont pas les somptueuses circonvolutions de nuages de Jupiter qui sont ciblées ici par les agences spatiales. Ce sont ses satellites : Europe, Callisto, Ganymède. Trois boules glacées en orbite autour de la plus grosse planète du Système solaire.



Trois mondes encore inexplorés, mais déjà jugés incroyablement prometteurs. Car depuis soixante ans, tous les indices convergent : loin d'être des terres arides et inertes comme notre Lune, ces corps seraient truffés d'étendues d'eau liquide – et salée – sous leur surface.

### CHACUNE SA PERSONNALITÉ

L'exploration a commencé au début des années 1970 par des observations depuis la Terre : de la glace d'eau semblait recouvrir certaines lunes autour de Jupiter, Europe en particulier. Il faut dire qu'à cette distance du Soleil, la température moyenne oscille entre -150 et -200 °C. « Mais c'était quand même les premiers indices de l'existence de ces océans souterrains, raconte Gabriel Tobie, planétologue au Laboratoire de planétologie et géosciences du CNRS à Nantes. On a commencé à calculer que les planètes géantes, du fait de leur gravité, exercent des forces de marée colossales sur leurs satellites, ce qui les déforme et les chauffe. Les premiers modèles ont alors montré qu'en raison de la chaleur interne de ces corps, il était raisonnable de

supposer qu'une couche liquide pouvait se créer entre l'intérieur chaud et la croûte de glace à la surface. »

Puis en 1979, la sonde spatiale Voyager 1 a pour la première fois survolé le système de Jupiter. Les astrophysiciens sont tombés de leur chaise : ils ont découvert des lunes très différentes les unes des autres, beaucoup plus intéressantes que ce qu'ils pensaient jusque-là. Europe, la plus proche de la géante, dévoile une surface très blanche striée de grandes fractures linéaires. Elle est glacée, certes, mais clairement jeune – une centaine de millions d'années tout au plus. Ce qui peut signifier une chose : elle est géologiquement active. L'énorme Ganymède, elle, est si grosse qu'elle surpasse Mercure en taille et offre une stupéfiante mosaïque de terrains sombres très cratérés, probablement anciens, jouxtant des zones claires plus jeunes. Tandis que la surface de Callisto apparaît de son côté très ancienne, datant probablement de la formation de Jupiter... La diversité de ces trois lunes devient aussitôt un grand sujet de questionnement. « Chacune a une vraie personnalité qui lui est propre », s'enthousiasme

Michel Blanc, astronome à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie.

Et entre 1995 et 2003, c'est la confirmation : la sonde Galileo détecte une modification du champ magnétique de Jupiter dans lequel elles baignent toutes. C'est le signe que les lunes contiennent en profondeur un matériau conducteur, un liquide qui crée un champ magnétique induit. Le meilleur candidat pour l'expliquer est un océan d'eau liquide et salée. Oui, il y a un océan sous la surface d'Europe ! Mais aussi de Ganymède, et probablement de Callisto ! « C'était une grande surprise de découvrir que des océans pouvaient exister sur quasiment tous les satellites galiléens », se rappelle Gabriel Tobie.

Sans compter que dans la foulée, entre 2004 et 2007, une autre sonde nommée Cassini découvre elle aussi des océans... →



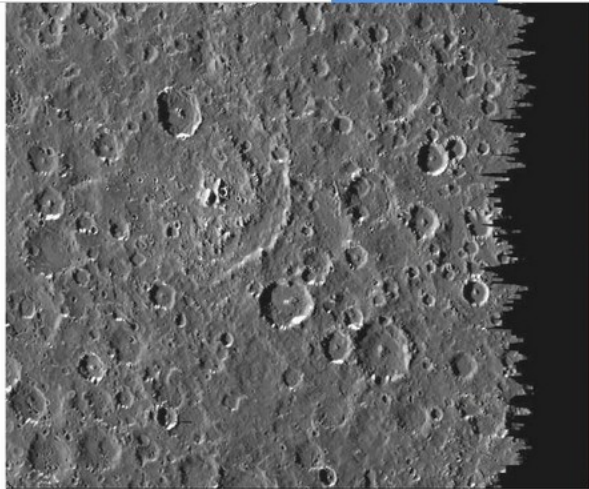
sous la surface des lunes de l'autre géante du Système solaire: Saturne. Sur Encelade, par exemple, dont la surface de glace presque immaculée exhibe d'immenses craquelures près de son pôle Sud, qui laissent échapper des jets de vapeur et de glace – l'origine de ces geysers peut difficilement être attribuée à autre chose qu'un océan souterrain liquide et salé. Même Titan, si singulière avec son atmosphère dense et ses lacs de méthane, semble dissimuler un océan interne, probablement composé d'eau et d'ammoniac. Jusqu'à Mimas, minuscule lune striée d'un terrible

## LES 3 LUNES DE JUPITER ABRITENT DES OCÉANS D'EAU SALÉE ! TRÈS VITE L'ESPOIR NAÎT...

cratère qui lui donne la même silhouette que l'étoile de la Mort dans *Star Wars*. En 2012, juste avant son ultime plongeon dans Saturne, Cassini en a renvoyé d'étranges données, interprétées aujourd'hui comme le signe de la présence d'un océan caché.

Tout le monde en est donc persuadé, notre Terre n'est pas le seul corps du Système à abriter de l'eau liquide en quantité. La question, aussitôt, surgit dans tous les esprits: de l'eau liquide... Et donc de la vie? Car sur Terre, partout où il y a de l'eau liquide, même au plus profond des abysses, une biologie s'est épanouie. Pourquoi pas dans les endroits aussi sombres et froids que les océans sous-glaciaires de ces lunes extraterrestres?

On sait que la vie a besoin d'eau, d'énergie et de composés chimiques permettant de fabriquer ses briques élémentaires (protéines, acides aminés). Les océans sous-glaciaires pourraient-ils cocher toutes les cases? L'espoir est là. En particulier pour Europe, dont on découvre que l'océan



## CALLISTO UN OCÉAN AGONISANT

C'est la plus lointaine des trois lunes ciblées par Juice, et donc celle qui subit le moins la pression gravitationnelle de l'énorme Jupiter. La chaleur insufflée par ses forces de marée est-elle suffisante pour maintenir une poche d'eau liquide? Les mesures de la sonde Galileo montrent un champ magnétique qui semble signer la présence d'un océan. «*Mais il peut avoir été en partie provoqué par des courants électriques dans l'ionosphère de Callisto, prévient Michel Blanc, astronome à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie. Juice devra lever cette ambiguïté.*» Un cas particulièrement excitant pour les spécialistes: s'il existe, cet océan arrive probablement à la fin de sa vie géologique, terminant doucement de se cristalliser. Un cas océanographique unique.

repose sur une couche de roche en profondeur... L'eau pourrait-elle s'enrichir en éléments chimiques en s'infiltrant dans le manteau rocheux? Les forces de marée qui la réchauffent de l'intérieur pourraient-elles former l'équivalent des fumeurs noirs des abysses terrestres, véritables oasis de biodiversité candidats à l'origine de la vie terrestre?

«*Bien sûr, comme toujours, tout n'est pas si simple, recadre Bruno Franzetti, directeur de recherche au CNRS, responsable du groupe Extrémophile à l'Institut de biologie structurale. Sur Terre, l'environnement des fumeurs noirs est soumis à des pressions de quelques centaines de bars seulement. L'océan d'Europe, lui, est beaucoup plus profond. On s'attend à ce que les pressions y atteignent plusieurs milliers de bars. Sans* →



## EUROPE DE RICHES ÉCHANGES MARINS

Pas de doute, cette lune de 3120 km de diamètre cache une étendue d'eau très salée et «tiède» – en profondeur, sa température pourrait atteindre des centaines de degrés. Un océan enfoui sous une croûte de glace de 10 à 30 km environ. Mais l'observation de panaches de vapeur d'eau par le télescope Hubble en 2014 et 2016 laisse supposer qu'en certains endroits la banquise pourrait être plus fine. Striée de fractures, elle pourrait même être animée d'une sorte de tectonique. Tandis que l'océan semble reposer directement sur un plancher rocheux, où des sources hydrothermales pourraient injecter de l'eau brûlante chargée en sels minéraux. «*Europe est pour l'instant la lune de Jupiter au plus fort potentiel exobiologique*», confirme Bruno Franzetti.

## GANYMÈDE UNE MER EMPRISONNÉE DANS LA GLACE

L'océan de Ganymède est probablement très différent de tout ce que l'on a pu connaître jusqu'ici: il serait pris en sandwich entre une croûte de glace de surface, épaisse de 50 à 100 km, similaire à celle qu'on trouve sur Terre, et une autre, beaucoup plus profonde, appelée glace à haute pression. Entre les deux s'étendrait une vaste étendue d'eau liquide d'une centaine de kilomètres d'épaisseur, probablement beaucoup moins salée et moins riche en minéraux que celle d'Europe. Mais Ganymède cache un autre atout: plus grosse que Mercure, elle est la seule à générer son propre champ magnétique qui, comme sur Terre, devrait protéger sa surface et son océan d'une partie des radiations cosmiques si agressives pour toute cellule biologique.



compter que d'autres paramètres comme la température, l'acidité ou la salinité se conjuguent pour favoriser ou inhiber l'habitabilité de ces environnements.»

« On ne sait pas s'il y a de la vie, réagit de son côté l'exobiologiste Lorenzo Carré, qui a travaillé sur le sujet. C'est pour cela qu'on y va ! Ce qu'on essaye de découvrir aujourd'hui, ce sont les différentes conditions qui pourraient rendre favorables son émergence et son maintien. »

Et les lunes glacées de s'imposer comme les pépites de la recherche de la vie extraterrestre: les lieux les plus favorables à l'épanouissement d'une autre biologie dans le Système solaire, les plus grandes chances de trouver des formes de vies en dehors de la Terre... Qui l'aurait cru? Si loin au-delà de la zone d'habitabilité du Soleil...

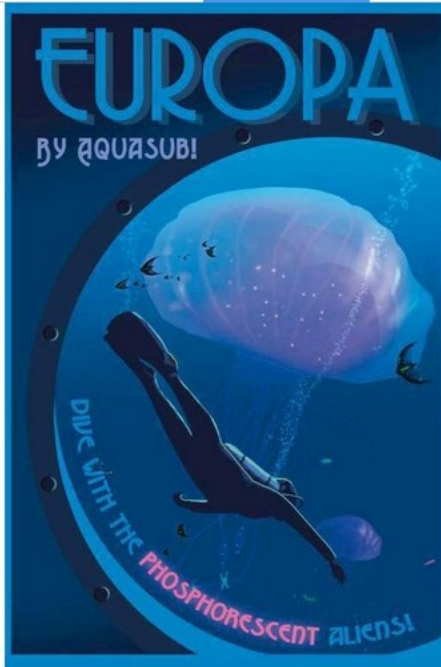
#### TERRIBLE CEINTURE DE RADIATIONS

C'est ainsi qu'au début des années 2000, l'idée d'une mission spécifique germe dans les esprits des astronomes, s'incrute dans les tableaux des budgets des agences. « L'idée est devenue concrète en 2008, retrace Olivier Witasse, responsable scientifique de la mission Juice à l'ESA, l'Agence spatiale européenne. À cette époque, c'était un projet commun avec la NASA: l'objectif était de lancer conjointement deux sondes, Jupiter Ganymède Orbiter pour l'ESA, qui est devenue Juice, et un orbiteur autour d'Europe pour la NASA. »

Sauf qu'Europe se révèle incroyablement difficile d'accès. Le problème n'est pas la distance, pourtant colossale. Ni la couche de glace qui bloque l'accès à l'océan – radars, magnétomètres peuvent la pénétrer... Non, ce sont les radiations: la lune est plongée dans les terribles ceintures de particules ionisées de Jupiter, de quoi griller la fragile électronique de n'importe quel orbiteur. Les ingénieurs s'effraient du blindage qui serait nécessaire pour la protéger: trop lourd, trop cher, trop complexe, trop risqué... La NASA se désengage du projet.

Un coup dur pour les scientifiques de l'Agence européenne, qui décident malgré tout de continuer la mission vers Ganymède. Mais la NASA n'a pas dit son dernier mot. La mission revient finalement, avec cette fois-ci un plan de vol moins risqué: la sonde restera en sécurité en orbite autour de Jupiter, et ne plongera dans ses ceintures de radiations que le temps de rapides survols au-dessus d'Europe, une cinquantaine au total, en descendant jusqu'à 25 kilomètres de la surface. C'est le projet Europa Clipper.

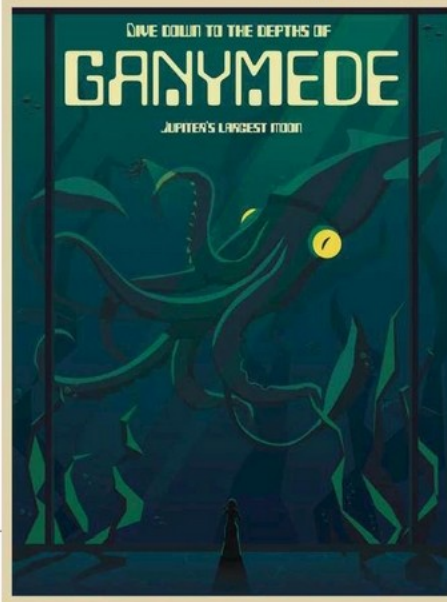
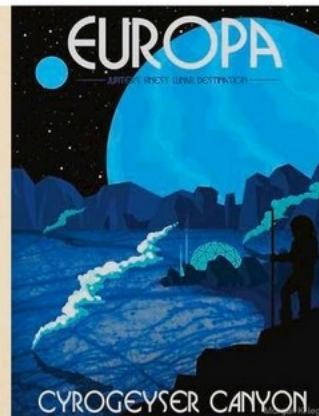
Juice aussi frôlera Europe, mais seulement deux fois, à 400 kilomètres d'altitude, avant de rejoindre Callisto, puis Ganymède. « Impossible de faire plus: rien que ces deux survols entameront 50% de la réserve de tolérance aux radiations de la sonde », prévient François Poulet, qui travaille sur la mission à l'Institut d'astrophysique spatiale.



## UN ELDORADO POUR LA VIE EXTRATERRESTRE

Les Martiens ont longtemps peuplé notre imaginaire, mais peut-être a-t-on fait fausse route. Indicateur d'un changement d'ère: depuis quelques années surgissent sur Internet des affiches de voyages fantasmant des méduses, des poulpes et autres habitants des océans des lunes glacées de Jupiter. Il faut dire que Mars est désespérément sèche depuis au moins 2 milliards d'années. Alors que ces lunes abritent de l'eau liquide, du carbone, de l'hydrogène, des minéraux... tout en subissant les forces de marée insupportables par la géante. Tout ce qu'il faut pour produire les molécules carbonées à la base de la chimie prébiotique.

M. GARDUCCI - JUNKY/PAUL - IER



À l'heure du décollage, le plan de vol de la sonde est calé: 2 survols d'Europe, 21 de Callisto, 12 de Ganymède, avant une mise en orbite autour de cette dernière vers décembre 2034. Une première! Jamais une sonde humaine ne s'est encore satellisée autour d'une autre lune que celle de la Terre.

#### CE N'EST QU'UN DÉBUT

Peu à peu, Juice ressertera son orbite. À 5000 kilomètres de distance, pour étudier le champ magnétique unique de Ganymède, photographier toute la surface en haute résolution, déterminer la composition chimique des éléments dispersés sur les différents terrains. Puis à 500 kilomètres: l'altimètre laser pourra alors dresser la topographie précise de toute la surface,

les radars sonder l'intérieur de la couche de glace jusqu'à une dizaine de kilomètres de profondeur, les mesures du champ de gravité révéler les structures plus profondes...

De quoi donner les dimensions des océans des trois lunes, un aperçu de leur composition chimique, de leur température. Traquer aussi d'éventuelles éruptions de panaches d'eau. Et enfin, isoler des « zones d'intérêt », comme disent les chercheurs: des cibles pour la prochaine génération de missions spatiales. Ce n'est que le début. « On en est aujourd'hui au même niveau que lorsque on envoyait les sondes Viking autour de Mars dans les années 1970, estime François Poulet. On commence seulement à faire quelques survols rapprochés, on tente des mises en orbite pour caractériser ces corps, mais comme sur Mars à l'époque, il manque encore les missions d'atterrissage, d'analyse in situ et, pourquoi pas, un jour, de retour d'échantillons sur Terre. »

Déjà, la Chine prévoit d'envoyer sa mission Tanwen-4 autour de Callisto. Et la NASA travaille à un atterrissage sur Europe. Percer sa glace pour atteindre l'océan, en revanche, « c'est de la science à très (très) long terme », ironise François Poulet. Ce n'est que le début d'une nouvelle phase de l'exploration planétaire: celle des océans extraterrestres, de l'océanologie comparée, et dans un sens, le vrai début de la recherche de la vie extraterrestre.

#### NOS SOURCES

S. Howell et al., *Geophysical Research Letters*(2018); O. Grasset et al., *Planetary and Space Science*(2013); W. B. Sparks et al., *The Astrophysical Journal*(2016); J. Saur et al., *Journal of Geophysical Research*(2015). Retrouvez toutes nos sources sur [lesepistoles.com/sources](https://www.lesepistoles.com/sources). Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilon*.



# TOPOS

ET SI LE PLUS ABSTRAIT DES CONCEPTS  
MATHÉMATIQUES POUVAIT ENFIN  
RENDRE L'IA INTELLIGENTE ?

PAR ROMAN IKONICOFF



SHUTTERSTOCK

Jean-Claude Belfiore lâche la phrase avec un naturel désarmant. « Les topos de Grothendieck pourraient amener l'IA à franchir la prochaine grande étape de son développement, celle de l'accès au sens. » Avouons-le: le propos est pour le moins énigmatique...

L'IA dont parle le directeur du laboratoire des technologies sans fil avancées de Huawei France, la branche hexagonale du mastodonte chinois des télécoms, c'est la nouvelle intelligence artificielle, celle constituée par les célèbres réseaux de neurones à apprentissage profond, ou deep learning, qui déferle sur le monde depuis une dizaine d'années – et dont ChatGPT est le dernier avatar.

Mais dans la phrase de l'ingénieur, il y a aussi l'expression « topos de Grothendieck », et là, c'est un peu plus compliqué. Il s'agit en effet d'un des concepts les plus profonds d'un des domaines les plus abstraits des mathématiques. Son inventeur – ou son découvreur, selon le point de vue – est Alexandre Grothendieck, considéré par beaucoup comme le plus grand génie des mathématiques du XX<sup>e</sup> siècle, mort seul, en 2014, dans la petite ville de Saint-Lizier, en Ariège. « Ce ne sont pas des mathématiques faciles, même pour un mathématicien », prévient l'ingénieur.

#### FOLLE AUDACE

Avais aux âmes sensibles: il est donc ici question de marier la plus disruptive des technologies modernes avec le plus abstrait des concepts mathématiques pour injecter dans la machine plus que la connaissance, le sens des choses!

Sachant que cette audace digne de Prométhée ne vient pas de n'importe qui. Jean-Claude Belfiore a embarqué dans cette expérimentation hors norme Laurent Laforgue, une sommité mondiale en géométrie algébrique, grand connaisseur de Grothendieck et des topos, qui a reçu la médaille Fields (l'équivalent du prix Nobel en maths) en 2002, et Daniel Bennequin, réputé en mathématiques pour ses travaux en géométrie sur les variétés différentielles. Comment une notion mathématique aussi haut

perchée que le topos pourrait-elle s'incarner dans le siliuim d'une intelligence artificielle? Si cela se confirmait, ce serait l'exemple le plus extrême de la fameuse « *déraisonnable efficacité des mathématiques* » pointée en 1960 par Eugène Wigner, lauréat du prix Nobel de physique. « *Comment se fait-il que les mathématiques, étant après tout un produit de la pensée humaine qui est indépendante de l'expérience, soient si admirablement adaptées aux objets de la réalité?* », s'étonnait aussi Albert Einstein quarante ans plus tôt.

Pour bien saisir ce vertige techno-épistémologique, il faut commencer par mieux cerner le sens de ce « sens », que ce petit groupe de scientifiques veut offrir aux IA via ces énigmatiques topos. Les IA sont des programmes, des algorithmes qui simulent des millions de neurones virtuels interconnectés, organisés en plusieurs couches, à la manière des couches cérébrales du système visuel des mammifères. Chaque neurone est un sous-programme autonome qui reçoit des informations des neurones en amont et en envoi en aval – des informations réduites à quelques bits, assimilés à un signal nerveux.

Reconnaissance des images, des langues, des maladies, traitement des big data pour anticiper les phénomènes, production d'images, de textes, découverte de nouvelles molécules, de nouveaux matériaux... cette structure des réseaux de neurones artificiels a révolutionné l'aide automatique pour tout un tas de disciplines et de secteurs. Mais tout puissant qu'il soit, ce type de système dit « à apprentissage profond » se heurte à un mur. « *Le problème est son incapacité à généraliser; démarre l'ingénieur. Le réseau apprend sur des données. Une fois l'entraînement fini, on le confronte à d'autres données, jamais vues, en espérant qu'elles soient assez proches de celles d'entraînement pour qu'il puisse les reconnaître. Mais voilà: de petites variations imperceptibles pour nous peuvent le désorienter. Pourquoi? Parce qu'il ne saisit pas le concept général derrière la profusion d'exemples. Il apprend en mode "perroquet".* »

Par exemple, si une IA est entraînée à reconnaître un chat avec des images où le félin apparaît toujours en bas, il se peut qu'elle soit incapable de le reconnaître en haut d'une image – et, au fond, même avec un bon entraînement,

cette IA ne saura jamais ce qu'est un chat... Cette faille du sens est exploitée par les capchas qui, pour garantir qu'on n'est pas un « robot », demandent à l'interne de cliquer sur les photos de ponts ou de bus, des images floues, partielles ou complexes: si l'IA pouvait savoir ce qu'est un pont ou un bus, comme nous, ce test serait inopérant.

#### AU-DELÀ DE L'INTUITION

En somme, la « *prochaine grande étape* » dont parle Jean-Claude Belfiore serait la conception d'une IA capable de saisir le concept de chat, de pont, de bus à un niveau d'abstraction dépassant la somme statistique de toutes les images qu'il en a vues. Vaste programme.

Et c'est là qu'arrivent les maths. « *Les mathématiques sous-jacentes au comportement des réseaux de neurones sont la pierre angulaire de la recherche*, souligne Guillaume Lajoie, à la tête du Neuro-AI Computations Research Group de l'université de Montréal.

On cherche une représentation mathématique qui réussirait à généraliser, à capter des invariants. » Par exemple, un réseau de neurones classique ne comprend pas qu'un objet solide reste le même quand il se déplace. « *C'est l'une des questions qu'on se pose aujourd'hui: comment décrire mathématiquement, et comment implémenter dans un réseau l'identité d'un objet en mouvement?* »

Une décennie à manipuler les réseaux de neurones a permis aux scientifiques de comprendre que cet accès au sens, cette sémantique, se joue au niveau de la manière dont sont organisés les neurones et leurs connexions. « *On cherche des modèles mathématiques qui décrivent le comportement des réseaux artificiels, non pas au niveau du neurone mais à celui de l'architecture du réseau, de sa connectivité* », appuie Guillaume Lajoie. C'est d'ailleurs grâce à leur architecture particulière qu'un certain type de réseau, les réseaux convolutifs, est déjà capable de réaliser en partie une généralisation: ils « comprennent » qu'un objet est toujours le même quand il se

#### UN CONCEPT QUI BOUSCULE LES MATHS DEPUIS PLUS DE 60 ANS

Sa définition formelle est tout un poème: « *Si X est l'espace considéré, son topos est la catégorie des faisceaux sur un site qui est lui-même une catégorie, dont fait partie X, munie d'une notion de recouvrement de ses objets par des flèches vers la catégorie des ensembles.* » Et ce concept, forgé dans les années 1960 par Alexandre Grothendieck, est si ramassé, si condensé, si abstrait... qu'il est resté depuis lors quasiment orphelin! Certes, il est présent dans les travaux mathématiques à la pointe aujourd'hui, mais seulement au coup par coup, comme outil dès qu'il y a besoin de caractériser un espace abstrait particulier. Et il n'est pas, ou peu, pris lui-même comme objet d'étude. « *Aujourd'hui encore, la plupart des mathématiciens ne connaissent pas les topos!* », s'emporte Alain Connes. Leur inventeur lui-même s'en émuait dans *Récoltes et Semailles*, son ouvrage fleuve, achevé en 1986 et finalement paru en 2022 chez Gallimard – un récit élevé et souvent amer de sa vie de mathématicien, dans lequel il règle ses comptes avec ses anciens collègues et disciples, qu'il accuse de les avoir enterrés vivants, lui et son concept.

long processus d'abstraction de la notion intuitive d'espace liée à notre représentation du monde réel. »

Dans les années 1950, pour pouvoir répondre à des défis en théorie des nombres lancés notamment par le mathématicien André Weil, Alexandre Grothendieck cherche un moyen d'élargir le concept d'espace bien au-delà de l'intuition. Peut-on voir l'ensemble des nombres entiers comme un espace géométrique alors qu'il n'est constitué que de points isolés (1, 2, 3...)? Comment y définir le concept de trajet, de distance? Plus généralement, qu'est-ce qu'un espace à minima? Grothendieck, aidé de ses collaborateurs, y a répondu de la manière la plus générale, refondant la géométrie algébrique. Et tout en haut, il a placé les topos, « *cette merveilleuse entité* », s'émeut Alain Connes.

Grothendieck voit dans ses topos l'aboutissement de son travail herculéen, la quintessence de l'espace, son alpha, son oméga. Le concept, écrit-il, « *englobe [...] aussi bien les traditionnels espaces [...] incarnant le monde de la grandeur continue, que les (soi-disant) "espaces" (ou "variétés")* »

AIDER L'IA À SURMONTER SON INCAPACITÉ À GÉNÉRALISER CE QU'ELLE A APPRIS



des géomètres algébristes abstraits impénitents, ainsi que d'innombrables autres types de structures, qui jusque-là avaient semblé rivées irrémédiablement au "monde arithmétique" des agrégats "discontinus" ou "discrets".

Ce que l'on peut dire, sans trop se perdre, c'est que les topos permettent de transporter ou traduire les propriétés géométriques d'un espace abstrait et impossible à imaginer, vers un autre univers beaucoup plus familier pour un mathématicien, celui des ensembles. Ils encodent les informations essentielles de cet espace sous la forme de relations variables entre différents ensembles. « La connaissance de cet univers des ensembles variables renseigne sur la nature profonde de l'espace de départ, peut-être mieux que l'observation directe de cet espace », ose Alain Connes. Or voilà : un réseau de neurones artificiels peut aussi être vu comme un espace, au sens élargi de Grothendieck.

D'où l'idée : et si le topos permettait de maîtriser les propriétés structurelles des réseaux de neurones artificiels ? Il est humainement impossible de comprendre le traitement de l'information qui s'y déploie, mais avec les topos, les informaticiens pourraient disposer d'une traduction intuitive de la manière dont s'organise l'information dans cet espace discontinu, fait d'unités séparées. Bref, de se représenter comment « pense » un tel réseau. Voir de structurer le réseau de neurones selon un topos a priori, de manière à lui imprimer des sémantiques adaptées à la tâche à laquelle il est destiné.

#### INATTENDU, SPÉCULATIF

Ne le cachons pas, cela reste flou. « Nous sommes à peine en train de démarrer », reconnaît Jean-Claude Belfiore – Laurent Lafforgue et Daniel Bennequin n'ont pas souhaité s'exprimer. En dehors du groupe, il n'y a pas non plus beaucoup d'informations techniques à pêcher. « La combinaison des topos et du machine learning est plutôt inattendue », commente Yann Ollivier, mathématicien du laboratoire d'intelligence artificielle de Facebook à Paris. « C'est une idée qui semble très intéressante, innovante. Les mathématiciens du groupe jouissent d'un immense prestige... Mais je ne peux pas juger leur travail en IA », répond de son côté Thierry Coquand, de l'université de Göteborg, en Suède, cocréateur du programme Coq, largement utilisé dans le monde qui assiste les mathématiciens dans leurs démonstrations.

Et, ne le cachons pas non plus, cela reste très spéculatif. « J'ai assisté à une séance du séminaire que Lafforgue a organisé à Huawei pour des informaticiens. Son exposé sur les topos était brillant, mais je n'ai pas eu le lien

## LE TOPOS PERMETTRAIT DE SE REPRÉSENTER COMMENT PENSE UN RÉSEAU DE NEURONES

avec les réseaux de neurones », raconte Pierre-Louis Curien, directeur de recherche émérite au CNRS, qui a, dans les années 1980, introduit dans le langage de programmation la théorie des catégories, à laquelle appartient les topos de Grothendieck. David Spivak, du Massachusetts Institute of Technology, spécialiste mondial de l'utilisation de la géométrie algébrique en informatique, dit, lui, ne pas beaucoup croire en « l'approche de l'équipe de Belfiore ». Quand d'autres, en off, durcissent le propos : « C'est spéculatif. »

Car Huawei n'a pas bonne presse, même dans le monde de la recherche. « Nous demandons aux chercheurs de ne pas participer aux activités de recherche de Huawei à Paris », clamait le 18 mai 2021 une tribune signée par des mathématiciens et publiée dans *Le Monde*. Ils soupçonnent l'entreprise, réputée être en lien étroit avec le Parti communiste chinois, et écartée du marché de la 5G dans plusieurs pays pour risque d'espionnage (dont la France et les États-Unis), de vouloir seulement redorer son blason par l'embauche de noms prestigieux.

Au cours de l'enquête, la gêne s'est installée. Mais l'hypothèse est là. Le vertige reste : et si le plus abstrait des concepts mathématiques permettait de rendre l'IA encore plus puissante ?

#### NOS SOURCES

Récoltes et Semailles I, II, d'Alexandre Grothendieck, Gallimard (2022) ; Mathematics for Future Computing and Communications, de Daniel Bennequin et Jean-Claude Belfiore, Cambridge University Press (2021) ; À l'ombre de Grothendieck et de Lacan, d'Alain Connes et Patrick Gauthier-Lafaye, Odile Jacob (2022) ; Retrouvez toutes nos sources sur [epsiloon.com](http://epsiloon.com)/sources. Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par *Epsilon*.

SHUTTERSTOCK

# POP SCIENCE



AVRIL 2023

« LA CRÉATIVITÉ, C'EST L'INTELLIGENCE QUI S'AMUSE »

ALBERT EINSTEIN  
(probablement apocryphe)

#### SOMMAIRE

85  
FUN FACTS  
Froid, sons graves, rats laveurs, Mayas, trous de vers, coqs, Neandertal, manchot géant, yéti, avalanche sous-marine...

88  
CULTURE SCIENCE  
Exposition « Ramsès II », une exploration de la légende

90  
PROJETS X  
Des hameaux qui jaillissent en boules ; une base sous-marine qui gonfle au soleil ; l'autobus qui copie le train

94  
INSTANT GEEK  
Bureau, roue, télescope et montre.

96  
LIFE  
Mentures mais polis, froid dangereux, timidité bien surmontée, déca placebo, roses dressantes, trompeuses images...

SHUTTERSTOCK

## Les rats laveurs ne mangent pas n'importe quoi

Food Webs

On ne fera pas passer ces rusés charognards pour de fins gourmets, mais quand même : entre de la viande faisaillée d'herbivore ou de carnivore, ils préfèrent assurément la première. Et même jusqu'à 6 fois plus, ont estimé des zoologistes américains après avoir analysé près de 60 000 heures d'images discrètement filmées en 80 points de la forêt bordant la rivière Savannah, dans le

comté d'Aiken, aux États-Unis. Face aux carcasses stratégiquement installées par les chercheurs, de vautours, poules et canards, leur préférence va clairement à la chair de ces derniers. Passion d'ailleurs largement partagée par tous les charognards de la zone, coyotes et opossums de Virginie en tête. J.-B.V.



## Il y a 25 000 ans, l'air était beaucoup plus sec

Nature

Nous étions alors en pleine période glaciaire et il y avait 70% de précipitations en moins qu'aujourd'hui. C'est en tout cas ce que révèle, au-dessus de la vallée du Rhin, des mesures fondées sur l'analyse des granules de cristaux de calcite sécrétés par les vers de terre de l'époque. Au passage, les étés n'étaient pas si frais que ça... V.N.





## Les coqs sont plus sociables s'ils ont été couvés au chaud

Applied Animal Behaviour Science

Il suffit d'augmenter la température de la couveuse de 1 ou 2°C pendant huit heures, entre quinze et vingt jours après la ponte, pour transformer leur tempérament. C'est ce qu'a démontré une équipe internationale d'agronomes après avoir couvé artificiellement 220 œufs, puis fait subir aux jeunes volatiles toute une batterie de tests

comportementaux depuis leur éclosion jusqu'à leur 42<sup>e</sup> jour. Résultat : les jeunes coqs ayant été cajolés à 38,6°C au lieu des 37,6 habituels ont appelé leurs congénères deux fois plus que les femelles issues de la même couvée. Quant à ceux qui ont bénéficié du traitement à 39,6°C, ils ont carrément multiplié par deux le temps passé avec autrui... Sachant que

d'autres études avaient déjà montré qu'à l'inverse, un léger coup de froid sur les œufs a tendance à renforcer la peur de la nouveauté. Les chercheurs suspectent que cette influence de la température sur le caractère des gallinacés augmente leurs chances de survie dans la nature en diversifiant leurs comportements. J.-B.V.



150  
kg

C'est le poids estimé des manchots géants qui peuplaient la Nouvelle-Zélande il y a 60 millions d'années. Les spécimens actuels sont 4 fois moins lourds.

## Plus il y a d'ours, plus on voit le yéti

BioRxiv

C'est la conclusion d'une vaste étude qui a soigneusement compilé les populations d'ours noirs recensées dans chaque État des États-Unis et chaque province du Canada, ainsi que les signalements de Big Foot, le légendaire yéti nord-américain. « J'ai ensuite corrigé ces données en fonction des densités de population et des superficies, qui jouent sur la probabilité qu'un humain voie un ours ou un supposé hominidé », précise Floe Foxon, spécialiste du traitement des données. Qui a conclu qu'un signalement de Big Foot semble émerger dans chaque zone peuplée de 900 ours noirs. « En théorie, ces témoignages pourraient être de bons indicateurs des populations d'ours, mais il faut être prudent : il existe toujours un risque de canular. » P.-Y.B.

1100 KM

C'est la distance record parcourue par une avalanche de sédiments sous-marins déclenchée le 14 janvier 2020 dans l'estuaire du fleuve Congo.

## On sait pourquoi les sons graves sont associés à des formes rondes

Scientific Reports

« Ce mystère entêtant nous a beaucoup fait cogiter », témoignent Mathilde Fort et Jean-Luc Schwartz, qui travaillent respectivement au Laboratoire de psychologie et neurocognition et au GIPSA-lab, à Grenoble. Pourquoi des sons comme «bouba» ou «malouma» sont-ils universellement jugés ronds, alors que «kiki» ou «takété» sont plutôt perçus pointus? «Après beaucoup de discussions, de tentatives mal formulées, nous sommes tombés sur un vieux résultat de mathématiques qui donne la clé : tout est dans la physique qui donne le lien entre forme et son.» Lorsqu'il tombe ou roule sur le sol, un objet rond produit des sons plus graves et continus que ceux, aigus et discontinus, produits par des objets pointus. Et notre cerveau intègre instinctivement ces propriétés physiques dans le langage. «Nous avons été très étonnés que notre modèle marche si bien.» A.P.

## Neandertal collectionnait les crânes d'animaux

28 de bisons, 2 d'anciens rhinocéros et 5 de cervidés, tous soigneusement nettoyés, ont été déterrés au nord de Madrid dans une grotte fréquentée il y a environ 60 000 ans par des néandertaliens. Des trophées de chasse, selon les archéologues. J.-B.V.

## Les trous de ver peuvent amplifier 100 000 fois la lumière

C'est ce que montre la modélisation numérique de cet objet hypothétique reliant deux régions distinctes de l'espace-temps. Grâce à l'effet de lentille gravitationnelle, les étoiles qui se trouvent derrière pourraient même apparaître trois fois. H.P.



C'est le nombre de gènes essentiels pour faire un excellent cheval de course. Dont certains liés à l'apprentissage et au développement du cerveau.

## Chez les Mayas, tout le monde buvait du chocolat

FNAS

Les riches comme les pauvres, les citadins comme les paysans, sur les coteaux comme dans la vallée : on consommait du cacao dans toutes les couches de la société maya. En témoignent 41 vases, bols et plateaux déterrés dans des vestiges de la vallée d'El Pilar, et scrupuleusement analysés grâce à la spectrométrie de masse. Au creux de l'argile de 18 d'entre eux a été décelé un des composés de la fève du cacaoyer, la théophylline. F.G.







## Ramsès & l'or des pharaons

# Une exploration de la légende

**Comment montrer la gloire de Ramsès II quand quasiment aucun objet lui ayant appartenu n'est parvenu jusqu'à nous? C'est le défi relevé par cette exposition qui ouvre sa tournée européenne à Paris.**

On y trouve bien sûr les incontournables: les faits d'armes du pharaon, les signes de prospérité de son long règne de 66 ans (1279-1213 av. J.-C.), qui resituent dans son époque la vie du grand roi de la XIX<sup>e</sup> dynastie. «*Nous sommes en partie prisonniers de son histoire, sourit Dominique Farout, commissaire de l'exposition pour la France. Mais nous apportons aussi un regard nouveau: nous explorons sa légende.*»

Une légende qui commence à sa mort – avec la survie de sa momie, déjà. Absente car trop fragile, elle est représentée par une pièce exceptionnelle parmi les 180 exposées: son cercueil en cèdre, exclusivement parisienne. «*Il n'était plus sorti d'Égypte depuis 1976 et la première exposition dédiée au roi à Paris,*

rappelle l'égyptologue de l'École du Louvre. *C'est inespéré.*» Témoignage émouvant: il porte les procès-verbaux des différents transferts destinés à protéger la dépouille au moment du pillage de la vallée des Rois. Une stratégie gagnante puisqu'elle sera retrouvée en 1881 au terme de l'une des plus incroyables aventures de l'égyptologie.

Mais la légende de Ramsès se nourrit aussi de ceux qui vont se revendiquer de lui, alors que l'Égypte décline: Ramsès III (XX<sup>e</sup> dynastie), les rois de Tanis (XXI<sup>e</sup> et XXII<sup>e</sup> dynasties)... «*Plus les choses dégèrent, plus lui grandit, plus ses prouesses sont réécrites*», décrypte Dominique Farout. Ainsi, dans les années 1930, dans le delta du Nil, des égyptologues pensent fouiller les ruines de Pi-Ramsès, son

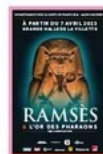
ancienne capitale, alors qu'il s'agit en fait de celles de Tanis, plus tardive. L'erreur s'explique: «*Voulant se fondre dans la légende de Ramsès, ses rois en avaient récupéré les pierres*», raconte le spécialiste. Mais la découverte réalisée par le Français Pierre Montet au début de la Seconde Guerre mondiale sera tuée par l'actualité. Ses pharaons (Psousennés, Chéchonq...) avaient pourtant conservé des trésors funéraires en or, présentés ici de manière inédite.

L'exposition, enfin, se nourrit du prestige de pharaons plus anciens... «*Ramsès a longtemps été confondu avec Sésocstris III, mort six siècles plus tôt. Ensemble, ils étaient le pharaon archétypal Ramsès-Sésocstris, s'amuse le chercheur. Nous faisons revivre cet étonnant épisode oublié.*» Voilà bien la réussite de cette exposition: renouveler l'image du pharaon le plus mythique en proposant un pas de côté et des histoires oubliées.



### Un cercueil mythique

Outre son illustre propriétaire, le cercueil de Ramsès II est remarquable par la délicatesse de ses traits – dont le style pourrait le faire remonter à la fin de la dynastie précédente, celle de Toutankhamon. Les vestiges de peintures (regard, sceptres...) et les textes qui le couvrent renforcent son magnétisme et son importance historique.



### EXPO RAMSÈS & L'OR DES PHARAONS

Exposition du 7 avril  
au 6 septembre 2022  
Grande Halle  
de La Villette, Paris  
Tous les jours de 10 h à  
19 h. Adulte 24 €, enfant  
14 à 14 ans) 20 €  
Réalité virtuelle: 15 €  
www.expo-ramsès.com

## AGENDA



### LIVRE

#### Mileva et Albert Einstein. L'impossible formule

Partage, séparation, collaboration scientifique... Un livre original explore la relation obscure des Einstein.

En librairie depuis le 2 mars  
Par Suzy Collin-Zahn,  
éditions EDP Sciences, 92 pages, 12 €

### EXPO

#### Félins

Une grande exposition familiale très prometteuse avec les 38 espèces de félins du Globe.  
Du 22 mars au 7 janvier 2024,  
de 10 h à 18 h, sauf le mardi  
Grande Galerie de l'Évolution,  
à Paris, 13 €

### FILM

#### Tetris

Plongée dans l'histoire du célèbre jeu vidéo créé en pleine guerre froide.

Sur Apple TV+ à partir du 31 mars  
Réalisé par Jon S. Baird

### LIVRE

#### Les plantes font leur cinéma

Dans *Sœurs froides, Seul sur Mars*... elles furent aussi des personnages de films. Un livre leur rend hommage, sur un ton humoristique.

En librairie le 1<sup>er</sup> avril  
Par Katia Astafieff, éditions Dunod,  
224 pages, 20 €

### FESTIVAL

#### Turfu

Tout un programme autour du « monde de demain »: l'occasion de belles rencontres avec des scientifiques.

Du 11 au 15 avril  
Au Dôme de Caen et en Normandie,  
accès libre



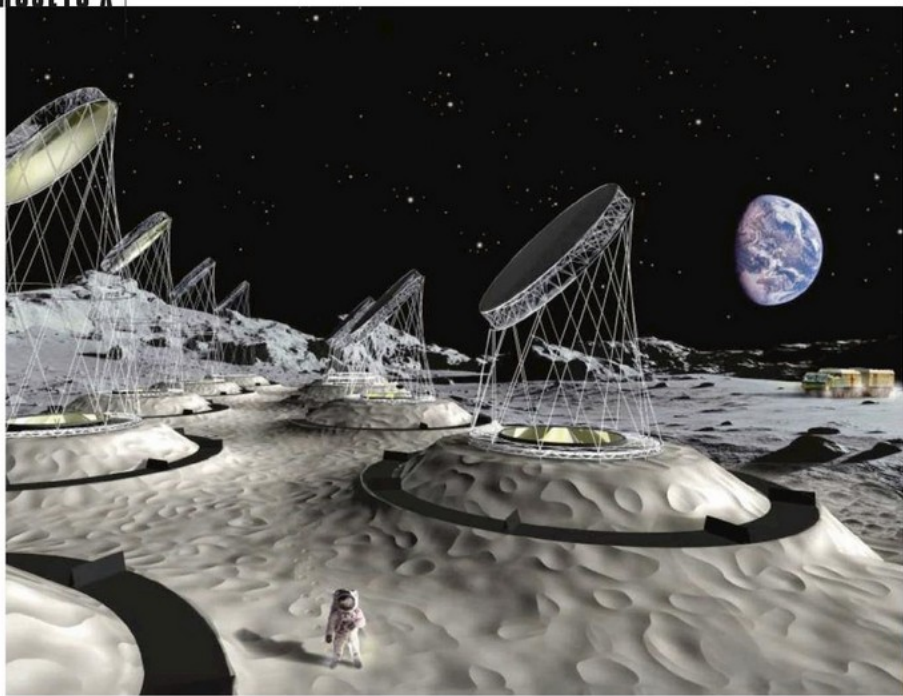
SKYSCRAPER CITY OF TIANKENG

## Des hameaux qui jaillissent en boules

Installés au fond d'un gouffre, des villageois de la province du Yunnan, en Chine, vivent coupés de tout accès facile aux infrastructures collectives. D'où l'idée folle lancée par un groupe d'architectes de tendre, en haut de cette percée naturelle, des sortes de cocons dans lesquels ils pourraient vivre. Connectées les unes aux autres par des treillis, comme les atomes d'une molécule, chacune de ces sphères accueillerait un mini-quartier, au microclimat spécifique.







## Une base sous-lunaire qui gonfle au soleil

PNEUMOCELL

En surface, de grands miroirs rotatifs suspendus par des câbles pour capter le rayonnement solaire; en dessous, des logements abrités sous des petits monticules recouverts de 4 ou 5 mètres de roche. Une équipe autrichienne a inventé un curieux concept d'habitat lunaire. Un village gonflable qui protégerait les astronautes et leurs cultures des météorites, radiations cosmiques et autres températures extrêmes.

## L'autobus qui copie le train

SYMONE

L'auto-train n'existe plus depuis 2019... Voici peut-être son successeur: un long bus imaginé par une start-up française, pour embarquer en toute tranquillité 6 à 9 véhicules avec conducteurs et passagers. Il sera propulsé par un moteur électrique et alimenté par de l'hydrogène décarboné. Un premier prototype est déjà prévu, pour 2024. Il attendrait ses voyageurs à des stations de péage où ils pourraient embarquer pour un long trajet partagé.



## Des fenêtres liquides pour économiser l'énergie

Le principe? Truffer leur verre d'un système de minuscules canaux pleins de fluides aux propriétés optiques différentes pour filtrer sur mesure les rayons qui les traversent. La lumière passe, mais la chaleur est régulée: le filtrage des infrarouges, par exemple, fait baisser la température intérieure. C'est l'idée étonnante proposée par des physiciens de l'université de Toronto. Leur objectif: aider à réduire l'usage de la climatisation. Ils se sont inspirés ici du calmair, qui change de couleur en fonction de son environnement. Alors, pourquoi pas les vitres? Reste à réussir l'étape du prototype. Les premiers tests sont prometteurs: des minipompes réussissent à activer et à stopper la circulation des fluides dans des canaux de l'ordre du millimètre; et les chercheurs parviennent à filtrer les longueurs d'onde voulues, et même à réguler l'intensité et la dispersion de la lumière. Des résultats qui leur font espérer économiser jusqu'à 50% d'électricité par an sur la climatisation et l'éclairage...



## Ceci est un bureau

«Pendant le confinement, un client m'a demandé de lui fabriquer un bureau discret... Tout le défi était d'arriver à obtenir une forme élégante et stable une fois qu'il est déplié.» C'est en partant de ces contraintes que Robert van Embricqs a conçu ce plateau en lattes qui se transforme en table d'un simple geste de la main. «J'ai opté pour du bois de chêne et de noyer, relié par des charnières en laiton pour garantir la solidité», précise le designer néerlandais, qui a ajusté une à une les trente lamelles de ce meuble capable de supporter 18 kilos. Sa forme incurvée garantit également une certaine intimité.

The Flow Wall Desk, 2600 € environ.



**POURQUOI  
ON N'Y A PAS  
PENSÉ AVANT ?**



**Le masque qui  
atténue les sons**

«Je travaillais sur les longs courriers et je me demandais comment gérer les conversations confidentielles pour déranger le moins possible les passagers. C'est comme ça que j'ai pensé à un masque», explique Stéphane Hersen, fondateur de la start-up toulousaine Skyted. Avec l'aide de l'Onera, l'inventeur a conçu un cache à poser devant la bouche, utilisant des métamatériaux chargés d'absorber les sons – une techno déjà utilisée dans l'industrie pour atténuer le bruit des moteurs d'avion à réaction. «Avec ce masque, le niveau sonore est atténué de 30 à 40 dB pour l'entourage : on n'entend quasiment plus rien. Mais le son à l'intérieur du masque, lui, est capté par un micro et renvoyé via un téléphone, par exemple.» Au passage, il protège même la conversation des bruits extérieurs. Tout est au point : il devrait commencer à être fabriqué d'ici la fin de l'année.

## Le télescope qui voit malgré la pollution lumineuse

Son secret? Une «technologie brevetée qui accumule la lumière provenant des objets visés, doublée d'un calculateur traitant les images au fur et à mesure pour faire disparaître les signaux parasites», explique Laurent Marfisi, directeur de l'entreprise Unistellar, à l'origine de ce nouveau télescope. Nous n'en saurons pas plus... Si ce n'est qu'il permet d'observer étoiles, nébuleuses et comètes en pleine ville – l'ingénieur assure l'avoir testé avec succès dans le chaos lumineux de Tokyo, Paris et Las Vegas. Pour cela, il faut d'abord installer l'application qui l'accompagne sur son smartphone. Il suffit d'indiquer dessus l'objet céleste que l'on recherche pour que le télescope balaie le ciel, compare les points lumineux avec sa base de données, et pointe directement sur la cible en moins d'une minute.

Equinox 2, 2500 € environ.

## Une montre solaire à l'autonomie record

Il lui suffit d'être exposée une journée au soleil pour tenir six mois sans recharge... Plus besoin de pile donc. Festina a donné peu de détails sur la techno elle-même, mais une mini-cellule solaire, conçue par la manufacture japonaise Miyota, tient entre le verre et le cadran sans quasiment se voir. Non utilisée, elle peut même conserver sa charge 48 mois.

Solaire, à partir de 140 €.

## Des roues qui freinent

Le système de freinage est directement intégré dans ces roues pour fauteuil roulant, sur le même principe que celui du rétropédalage dont sont équipés certains vélos.

«L'idée m'est venue en regardant les vélos hollandais», réagit Colin Gallois, l'un de ses concepteurs. Résultat, une simple pression vers l'arrière suffit à ralentir le fauteuil sans blesser les mains. L'effort serait divisé par cinq par rapport à un modèle classique, sur lequel il faut freiner avec la main courante.

Dreft, environ 2000 € la paire à clipser.





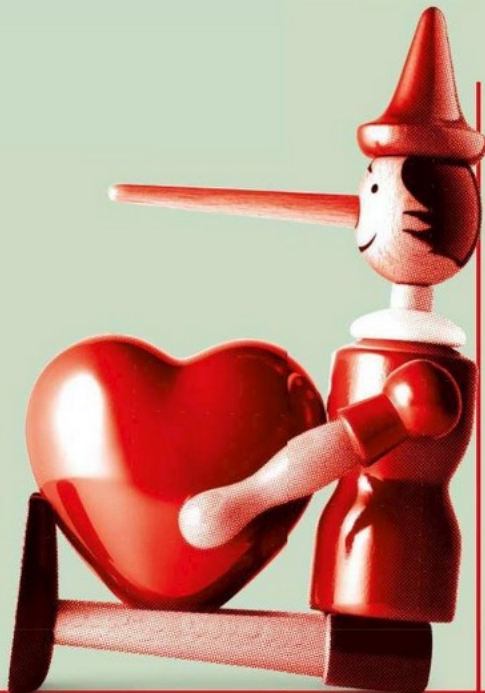
## On préfère que les enfants mentent poliment

J. Moral Educ., octobre 2022

Encore un étrange dilemme inventé par la psychologie pour nous mettre à l'épreuve... Qu'est-ce qui est le pire : mentir pour protéger sa sœur, en disant qu'on ne sait pas où elle se trouve ? Ou mentir pour ne pas dire à quelqu'un qu'il joue mal au piano, afin de ne pas manquer aux règles de la politesse ? Deux criminologues américaines ont

recueilli les jugements de 438 adultes mis face à des enfants formulant ces deux types de mensonges – ils avaient aussi le droit d'être honnêtes, voire de dire une demi-vérité ou un demi-mensonge. Le résultat est étonnant : certes, les menteurs qui protègent quelqu'un sont fortement récompensés. Mais les menteurs polis, eux, sont jugés avec

beaucoup plus d'indulgence. Et sont même souvent félicités ! La franchise des enfants est donc en général moins appréciée que leur subtilité. Et le sens de la politesse serait parfois plus important que la vérité. « *Il ne faut donc pas s'étonner que les enfants sachent nuancer leurs mensonges dès le plus jeune âge* », en concluent les chercheuses.



## Avoir froid, c'est très dangereux

Circulation, janvier 2023

Et avoir trop chaud aussi ! On le savait, mais les études restaient confuses. Or voici que de nouveaux travaux en donnent enfin la preuve formelle : le cœur est vulnérable aux températures extrêmes. Au total, ce sont 32 millions de décès pour cause de maladie cardiovasculaire qui ont été scrutés sur quatre décennies, dans 567 villes de 27 pays. Confirmant que les jours les plus chauds et les plus froids, on enregistre bien un surplus de morts par défaillance cardiaque, infarctus, AVC... Mais c'est le grand froid qui est le plus dangereux : il provoque 9 décès supplémentaires pour 1 000, contre 2 pour les fortes chaleurs.

## Tout le monde se trompe pareil sur les images

Psychol. Sol., décembre 2022

Non, le bonhomme du *Monopoly* n'a pas de monocle. Pas plus que Pikachu n'a de tache noire au bout de la queue. Ni C-3PO deux jambes dorées (l'une d'elles est en fait argentée). Or, la majorité des gens ont en tête une image erronée de ces personnages iconiques. Non seulement notre mémoire nous fait défaut, mais surtout, elle tend à enregistrer la même fausse version chez tout le monde : un faux souvenir partagé. Un effet confirmé par une batterie de tests réalisés par des chercheurs de Chicago, qui ont constaté sa force pour sept images en particulier, et démontré que nous nous trompons dans 66% des cas. Plus troublant : l'erreur persiste après avoir regardé l'image d'origine. Et ce, même avec la plus grande attention. Les chercheurs ne voient pour l'instant aucune explication à cette bizarrerie...

## Il faut 5 jours pour surmonter sa timidité

JESP, septembre 2022

L'expérience réalisée par un trio de psychologues anglo-saxons est simple : pousser deux cents jeunes volontaires à parler à des inconnus dans la rue, du lundi au vendredi, et cela plusieurs fois par jour. Le prétexte ? Un jeu de chasse au trésor rémunéré. L'objectif ? Prouver que parler à des inconnus, c'est facile et agréable. Pari réussi. À la fin de la semaine, les participants craignaient moins d'être rejetés et devenaient confiants dans leurs capacités à soutenir une conversation et à faire bonne impression. Ils conservaient même cette confiance sept jours plus tard. Les chercheurs invitent tout le monde à essayer.

## Les roses, ça déstresse vraiment

Explore, sous presse

Oubliez la lavande, le vrai antistress, c'est le parfum des roses. C'est la conclusion d'un essai mené en situation réelle avec 118 infirmières iraniennes exerçant à l'hôpital. Elles ont travaillé deux heures par jour, pendant un mois, avec un tube à essai fixé au premier bouton de leur blouse. Il contenait soit de l'huile essentielle de rose de Damas, soit de l'huile essentielle de lavande, soit de l'huile de sésame, réputée inodore. Au bout de cette période, les chercheurs ont pu constater que si le parfum de lavande atténuait un peu le stress ressenti, seul celui de la rose l'abaissait significativement : deux de ses molécules aromatiques en particulier auraient une action anxiolytique.

## Le déca est un vrai placebo du café

J. Psychopharmacol., février 2023

Évaporés, maux de tête et nausées. Chez 40 accros au café privés de leur petit noir depuis 24 heures, les symptômes du manque de caféine ont bel et bien diminué en buvant un décaféiné. Comme l'effet placebo d'un médicament sans substance active, mais qui agit pourtant. Mieux : le déca faisait quand même effet quand il était bu sciemment. Sa chaleur, son parfum, le glouglou de la cafetière feraient aussi la magie du café.





# epsilon <sup>∞</sup> n #6

Hors-Série

nouveau magazine d'actualité scientifique

ET SI NOTRE PARESSE  
ÉTAIT UN SUPER-POUVOIR

LA PARTICULE  
QUI A SAUVÉ LE MONDE

POURQUOI NOTRE CERVEAU  
ADORE SUPERMAN

# SUPER POUVOIRS

hop

FACE AUX  
MONSTRES  
DU COSMOS

TOP 5 DES  
SUPER-CONCEPTS  
MATHÉMATIQUES

**LE DOSSIER SURPUISSANT**

SERPENT VOLANT, FLEUR MUTANTE, GRENOUILLE À GRIFFES...  
RENCONTRE AVEC LES VRAIS SUPER-HÉROS

En vente chez votre  
marchand de journaux



« On ne sait pas s'il y a de la vie. C'est pour cela qu'on y va ! »

Lorenzo Carré,  
à propos des lunes  
glacées de Jupiter  
p. 78

« L'effet cocktail party  
est un défi technique pour  
l'étude des chauve-souris  
en colonie »

Yosel Prat,  
à propos du Google  
Translate des animaux  
p. 64

« Ce ne sont pas des  
mathématiques faciles, même  
pour un mathématicien »

Jean-Claude Bellière,  
à propos du topos  
p. 82

« L'idée m'est venue en  
regardant les vélos hollandais »

Colin Gallois,  
à propos des roues  
qui freinent  
p. 95

« Les baleines ne parlent pas  
de la réforme des retraites... »

François Yvon,  
à propos du Google  
Translate des animaux  
p. 63

« Attention à ne pas  
en faire une panacée »

Balwant Singh,  
à propos du biochar  
p. 59

« Il devrait être possible de  
parvenir au même résultat avec  
de simples ressorts »

Daniel Renjewski,  
à propos du pied  
p. 70

« Nous explorons  
sa légende ! »

Dominique Farout,  
à propos de l'exposition  
Ramsès & l'or des pharaons  
p. 88

« Il faut être  
prudent: il existe  
toujours un risque  
de canular »

Floë Foxon,  
à propos du yéti  
p. 87

« C'était un sentiment doux-amer  
de le voir protéger ses œufs  
pendant huit semaines sachant  
que sa fin était proche... »

Kat Zhou,  
à propos de la couvée d'une  
pieuvre du récif corail  
p. 18

« Quand nous sommes seuls  
longtemps, nous peuplons le  
vide de fantômes »

Gay de Maupassant,  
à propos du secteur sombre  
p. 53

« Ce mystère entêtant nous  
a fait beaucoup cogiter »

Mathilde Fort,  
à propos des sons graves  
à des formes rondes  
p. 86

• Les 103 scientifiques interrogés par la rédaction pour ce numéro

- |  |   |  |   |   |  |  |  |
|--|---|--|---|---|--|--|--|
| Sanael Ahiven<br>Biochimie des sels, Péru        | Julian Bellais<br>Biologie, Pays-Bas      | Charlotte Caré<br>Biologie, Pays-Bas               | Astrid Guilloume<br>Démographie, Pays         | Tim Landgraf<br>Biologie, Allemagne           | Stavros Niakouris<br>Biologie, Grèce     | Jérôme Riedi<br>Physique, Suisse         | Toshihiko Takemura<br>Chimie, Japon      |
| Olivier Adam<br>Mécanisme, Suède                 | Olivier Boecher<br>Chimie, Pays-Bas       | Pierre-Louis Carion<br>Information théorique, Pays | Benjamin S. Halpern<br>Cosmologie, États-Unis | Johannes Lehmann<br>Biologie, Allemagne       | Yves Olivier<br>Mécanisme, Pays          | Leslie Rosenbus<br>Physique, États-Unis  | Anthony Thomas<br>Physique, Australie    |
| Jim Alexander<br>Physique, États-Unis            | Frank Brähler<br>Séisme, Allemagne        | Luc Barad<br>Physique, Israël                      | Dilip Banerjee<br>Physique, États-Unis        | Robert Parys-Dumortier<br>Physique, Allemagne | Caroline Tardif<br>Biochimie, France     | Caroline Tardif<br>Biochimie, France     | Caroline Tardif<br>Biochimie, France     |
| Robert Allen<br>Cosmologie, États-Unis           | Etienne Briefer<br>Cosmologie, États-Unis | Yagdy Dacarcvalha<br>Physique, États-Unis          | Mathias Hestert<br>Physique, États-Unis       | Umberto Lombardo<br>Astronomie, Espagne       | Mathias Hestert<br>Physique, États-Unis  | Mathias Hestert<br>Physique, États-Unis  | Mathias Hestert<br>Physique, États-Unis  |
| Carlos Argüelles-Delgado<br>Physique, États-Unis | Lorenzo Carré<br>Astronomie, Italie       | Sebastien Descotes-Cannon<br>Physique, Suisse      | David Hasbani<br>Biochimie des sels, Biologie | Francis Parcy<br>Biochimie, France            | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Karen Bekker<br>Génétique, Canada                | Isabelle Chapiro<br>Physique, Espagne     | Martin Brubaker<br>Cosmologie, France              | Richard van der Vliet<br>Physique, Pays-Bas   | Antoine Poutier<br>Cosmologie, France         | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Alison Barber<br>Physique, États-Unis            | Andreas Chiles<br>Physique, Allemagne     | Claudia Kammann<br>Physique, Allemagne             | David Marsh<br>Physique, Allemagne            | Olivier Poch<br>Physique, Allemagne           | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Laura Baudin<br>Physique, Suisse                 | Philippe Collin<br>Cosmologie, États-Unis | Samah Karaki<br>Neurosciences, Pays                | Laurent Marzari<br>Physique, États-Unis       | Pascal Poljak<br>Cosmologie, États-Unis       | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Jean-Claude Bellière<br>Mécanisme, Pays          | Alain Cerny<br>Mécanisme, Pays            | Raphael Kay<br>Génétique, États-Unis               | Yves Martinet<br>Biologie, France             | Francis Parcy<br>Biochimie, France            | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Nicolas Bellonin<br>Cosmologie, France           | Thierry Cressand<br>Mécanisme, Suisse     | Colin Gallois<br>Physique, France                  | Andreas Chiles<br>Physique, Allemagne         | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Clémentine Buisson<br>Physique, États-Unis       | Annelle Cuvier<br>Physique, France        | Guillaume Lajoie<br>Mécanisme, Canada              | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Clémentine Buisson<br>Physique, États-Unis       | Annelle Cuvier<br>Physique, France        | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas           | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |
| Clémentine Buisson<br>Physique, États-Unis       | Annelle Cuvier<br>Physique, France        | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas           | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas      | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas | Yosel Prat<br>Google Translate, Pays-Bas |





# Nos experts sont à vos côtés pour bien gérer vos placements

Chez Allianz, 1 200 conseillers experts en gestion de patrimoine sont à vos côtés partout en France pour vous accompagner et vous aider à préparer votre futur avec des solutions épargne, retraite et transmission adaptées.

Pour plus d'informations et prendre rendez-vous avec le conseiller le plus proche de chez vous, rendez-vous sur [allianz.fr](http://allianz.fr) ou flashez ce QR Code.



Prêts pour demain