POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

# POUR LA SCIENCE

L 13256 - 524 S - F: 6,90 € - RD

JUIN 2021
N° 524

ARCHÉOLOGIE
**LA PLUS ANCIENNE CARTE RETROUVÉE EN EUROPE**

ASTRONOMIE
**DES TÉLESCOPES SUR LA FACE CACHÉE DE LA LUNE**

MATHÉMATIQUES
**ALIGNEMENTS DE POINTS : DE JOLIS PROBLÈMES !**

## Physique des particules

# LE MUON ÉBRANLE-T-IL LE MODÈLE STANDARD ?



DOM : 7,90 € – BEL./LUX. : 7,90 € – CH : 12,70 CHF – CAN. : 12,50 $CA – TOM : 1040 XPF

## PLASTIQUES

**DÉJÀ 6 MILLIARDS DE TONNES DANS LA NATURE… COMMENT NE PAS EN RAJOUTER ?**



# Vaincre®

# LE CANCER

NOUVELLES RECHERCHES BIOMEDICALES

## PRENONS UNE LONGUEUR D'AVANCE SUR LE CANCER
## QUI RESTE LA 1ÈRE CAUSE DE MORTALITE PREMATUREE EN FRANCE




Madame Anne Gravoin, musicienne et Présidente de Music Booking Orchestra
Administratrice au sein de VAINCRE LE CANCER

Chaque année, 400.000 nouveaux cas de cancer, tout type confondu, sont dépistés.
Statistiquement, il y a un peu plus de 1000 nouveaux malades par jour,
parmi lesquels 600 vont guérir et 400 vont mourir.

**AIDEZ NOS CHERCHEURS À SAUVER VOS VIES**

**Rejoignez le combat, donnez sur**
**vaincrelecancer-nrb.org**

**Vous souhaitez faire un don IFI : les dons au profit de la Fondation INNABIOSANTE C/i VAINCRE LE CANCER sont déductibles de l'IFI.**

**VAINCRE LE CANCER - NRB**
Hôpital Paul Brousse
12/14, avenue Paul Vaillant-Couturier
94800 VILLEJUIF
**www.vaincrelecancer-nrb.org**
**contact@vaincrelecancer-nrb.org**

**SERVICE MECENAT**
**01 80 91 94 60**
*Coût d'un appel local*

**RETROUVEZ-NOUS SUR**
facebook YouTube twitter

POUR LA SCIENCE

**www.pourlascience.fr**
170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

**Groupe POUR LA SCIENCE**
**Directrice des rédactions**: Cécile Lestienne

**POUR LA SCIENCE**
**Rédacteur en chef:** Maurice Mashaal
**Rédactrice en chef adjointe:** Marie-Neige Cordonnier
**Rédacteurs:** François Savatier, Sean Bailly
**Stagiaire:** Théo Torcq

**HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE**
**Rédacteur en chef adjoint:** Loïc Mangin

**Développement numérique:** Philippe Ribeau-Gésippe
**Community manager:** Aëla Keryhuel

**Conception graphique:** William Londiche
**Directrice artistique:** Céline Lapert
**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
**Réviseuse:** Anne-Rozenn Jouble
**Marketing & diffusion:** Charline Buché
**Chef de produit:** Eléna Delanne
**Direction du personnel:** Olivia Le Prévost
**Secrétaire général:** Nicolas Bréon
**Fabrication:** Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
**Directeur de la publication et gérant:** Frédéric Mériot
**Anciens directeurs de la rédaction:** Françoise Pétry et Philippe Boulanger
**Conseiller scientifique:** Hervé This
**Ont également participé à ce numéro:** Maud Bruguière, Florian Debras, Sylvie Demouchy, Jean-Jacques Hublin, Anne Lespine, Étienne Patin, Marc-André Selosse

**PRESSE ET COMMUNICATION**
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr

**PUBLICITÉ France**
stephanie.jullien@pourlascience.fr

**ABONNEMENTS**
www.boutique.groupepourlascience.fr
**Courriel:** serviceclients@groupepourlascience.fr
**Tél.:** 01 86 70 01 76
**Adresse postale:**
Service abonnement
Groupe Pour la Science
56 rue du Rocher
75008 Paris

**Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)**
**France métropolitaine:** 59 euros – Europe: 71 euros
**Reste du monde:** 85,25 euros

**DIFFUSION**
**Contact kiosques:** À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél. 04 88 15 12 47
**Information/modification de service/réassort:**
www.direct-editeurs.fr

**SCIENTIFIC AMERICAN**
**Editor in chief:** Laura Helmut
**President:** Stephen Pincock
**Executive vice president**: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

**Origine du papier:** Autriche
**Taux de fibres recyclées:** 30 %
**«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»:** $P_{tot}$ 0,007 kg/tonne

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
10-31-1282
pefc-france.org

# ÉDITO



**Maurice Mashaal**
Rédacteur en chef

# UNE DÉFAILLANCE QUI SERAIT BIENVENUE

Depuis une cinquantaine d'années, les spécialistes du monde subatomique disposent d'une théorie robuste: le «modèle standard». Cet élégant édifice décrit les différents types de particules élémentaires et leurs interactions, et son succès ne s'est jamais démenti jusqu'ici: toutes les mesures expérimentales fiables ont livré des résultats en accord avec la théorie. Pour autant, les physiciens savent que le modèle standard n'est pas le fin mot de l'histoire, parce qu'il ne répond pas à plusieurs questions importantes – par exemple, pourquoi les masses de ses diverses particules sont ce qu'elles sont – et parce qu'il n'englobe que trois des quatre interactions fondamentales, la gravitation étant hors de son champ.

Comment aller au-delà de ce modèle? Les accélérateurs de particules les plus puissants n'ont pas produit à ce jour de nouvelles découvertes qui auraient confirmé ou, au moins, orienté les pistes envisagées par les théoriciens. Aussi une autre démarche prend-elle de l'importance: effectuer des mesures expérimentales de grande précision pour les comparer aux valeurs calculées au moyen de la théorie. Un écart signalerait alors une défaillance de celle-ci.

Des physiciens se sont ainsi concentrés sur la mesure et le calcul du «moment magnétique» du muon, une particule similaire à l'électron, mais environ 200 fois plus lourde (*voir pages 24 à 33*). Plus facile à dire qu'à faire! D'une part, il faut beaucoup de temps et d'efforts pour obtenir une valeur expérimentale dont la marge d'incertitude est suffisamment petite. D'autre part, même si les équations de base du modèle standard sont parfaitement définies, les calculs théoriques sont d'une redoutable complexité et ont donc eux aussi des marges d'incertitude, qu'il faut réduire le plus possible.

Toujours est-il que, il y a peu, un résultat expérimental différent de la valeur théorique a été annoncé. L'écart est-il assez grand pour acter une défaillance du modèle standard, qui serait bienvenue pour beaucoup de théoriciens? Pas tout à fait, mais presque. À cela s'est ensuite ajouté le résultat d'un autre calcul théorique, plus proche de la valeur mesurée... Une situation indécise, mais stimulante et facteur de progrès, qui illustre très joliment la façon dont la science se fait. ■

# SOMMAIRE

N° 524 / Juin 2021

## ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Du métissage ancien dans les populations océaniennes
- Le coût économique des invasions biologiques
- La fonte des glaciers accélère
- Le plomb, néfaste aux abeilles
- Éléphants et droïdes de sel
- Vers un traitement de la maladie de Huntington?
- Les ailes du requin-aigle
- Une géante gazeuse voyageuse

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
**Le progrès technique favorise-t-il la paix?**
*Gilles Dowek*

P. 20
DISPUTES ENVIRONNEMENTALES
**Vivre sur Terre... ou sur Mars**
*Catherine Aubertin*

P. 22
LES SCIENCES À LA LOUPE
**Ce que signifie «observer» en science**
*Yves Gingras*

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS LA P. 34 )

Mouvements sismiques : amplification sous surveillance
parrainé par
IRSN



**En couverture :**
© Shutterstock.com/Rashevskyi Viacheslav
Cuillère :
© Shutterstock.com/Ukrolenochka

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION
NE MANQUEZ PAS LA PARUTION DE VOTRE MAGAZINE GRÂCE À LA NEWSLETTER
- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

## GRANDS FORMATS



P. 38
PALÉOANTHROPOLOGIE
**HOMO NALEDI, LE GRIMPEUR QUI N'ÉTAIT PLUS UN SINGE**
*Jean-Luc Voisin*

L'anatomie de grimpeur d'*Homo naledi* semble aberrante: cette espèce vivait dans une région où les arbres étaient rares. Mais il pourrait s'agir d'une adaptation aux falaises et aux grottes, habitats qui étaient aussi ceux des australopithèques



P. 52
ENVIRONNEMENT
**LA POLLUTION INVISIBLE DES PLASTIQUES**
*Jean-Baptiste Fini*

Contenants, vêtements, pneus, meubles, masques... Quelle que soit leur utilisation, les plastiques contiennent de multiples substances qui diffusent dans l'environnement. On commence à mesurer l'ampleur du phénomène.





P. 46
TECHNOLOGIE
**QUE FAIRE DES EMBALLAGES PLASTIQUES?**
*Nathalie Gontard*

Les plastiques, dont les emballages représentent une forte proportion, finissent pour la plupart en déchets persistants. Une pollution massive qui prend de plus en plus d'ampleur et que l'on tente de juguler en mettant au point des procédés de recyclage et des matériaux biodégradables.

P. 60
ARCHÉOLOGIE
**«LA DALLE DE SAINT-BÉLEC SERAIT LA PLUS ANCIENNE CARTE CONNUE EN EUROPE»**
*Entretien avec Clément Nicolas et Yvan Pailler*

En 1900, une grande dalle gravée fut mise au jour dans un tumulus breton de l'âge du Bronze. Redécouverte en 2014, elle vient d'être étudiée: il s'agirait d'une carte représentant le territoire de l'un des princes qui régnaient dans la région.




P. 64
ASTRONOMIE

**DES RADIOTÉLESCOPES SUR LA FACE CACHÉE DE LA LUNE**
*Anil Ananthaswamy*

Plusieurs missions spatiales sont à l'étude pour installer des radiotélescopes sur la face non visible de la Lune. Objectif: sonder les «âges sombres» de l'Univers, ère reculée où les premières étoiles n'étaient pas encore apparues.



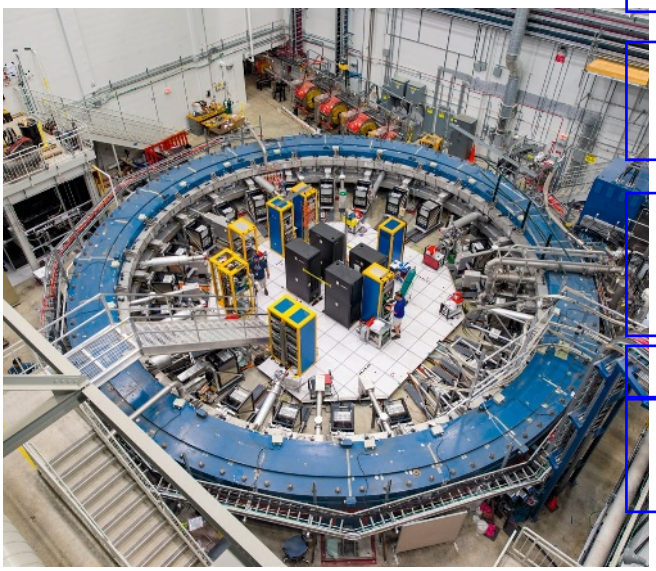


P. 72
HISTOIRE DES SCIENCES

**LE RAPT DE LA COCHENILLE MEXICAINE**
*Danielle Trichaud-Buti et Gilbert Buti*

Au XVIIIe siècle, un mystérieux petit insecte élevé au Mexique faisait fureur sur les marchés asiatiques et européens. Il attira les convoitises de nombreux aventuriers, dont un jeune naturaliste lorrain...


## À LA UNE




P. 24
PHYSIQUE DES PARTICULES

**LE MUON, un accroc dans le modèle standard ?**
*Sean Bailly*

Les mesures récentes d'une propriété du muon semblent incompatibles avec la valeur théorique de référence. Un résultat qui, s'il est confirmé, ferait vaciller le modèle standard de la physique des particules. Mais un nouveau rebondissement sème le trouble dans le trouble.

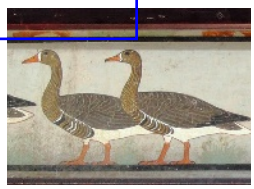

## RENDEZ-VOUS


P. 80
LOGIQUE & CALCUL

**DES POINTS QUI S'ALIGNENT... OU PAS**
*Jean-Paul Delahaye*

Les alignements possibles d'un ensemble fini de points du plan posent de redoutables et délicieux problèmes.

P. 86
ART & SCIENCE
**Les aventuriers de l'oie perdue**
*Loïc Mangin*


P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
**La cafetière qui ne manque pas d'air**
*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
**La curieuse rencontre de l'oursin et du pancréas**
*Hervé Le Guyader*

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
**Comment pocher des œufs**
*Hervé This*

P. 98
À PICORER

# ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.18 *Homo sapiens informaticus*
P.20 *Disputes environnementales*
P.22 *Les sciences à la loupe*

GÉNÉTIQUE

# DU MÉTISSAGE ANCIEN DANS LES POPULATIONS OCÉANIENNES



Les habitants des archipels du Pacifique ont acquis des gènes qui les ont aidés à résister aux disettes et aux agents infectieux. Une partie de ces gènes sont d'origine dénisovienne.

**Le séquençage des génomes de plus de 317 individus d'Océanie révèle des métissages anciens qui ont conféré aux populations de la région quelques avantages adaptatifs.**

Au-dessus de 25 d'indice de masse corporelle, il y a surpoids. Or, en Polynésie française, l'indice de masse corporelle moyen est de 29,1. La diffusion de la nourriture industrielle et les changements de modes de vie ont mis la région du Pacifique en tête du classement mondial de l'obésité et du diabète. Cette situation a aussi des racines génétiques, que révèle une équipe réunie autour de Lluis Quintana-Murci, de l'institut Pasteur à Paris.

Ces chercheurs ont séquencé les génomes complets de 317 individus issus de 20 populations du Pacifique. Les chercheurs ont recherché dans ce matériel génétique les signes de balayages sélectifs, c'est-à-dire des processus qui augmentent la fréquence des mutations avantageuses jusqu'à les fixer. Ils en ont par exemple identifié un pour le gène *RANBP17*, associé à l'indice de masse corporelle et au niveau de cholestérol de haute densité, ainsi qu'un autre pour le gène *OSBPL10*, associé à la dyslipidémie, c'est-à-dire à une concentration anormale de lipides dans le sang.

Il apparaît que l'adaptation des populations océaniennes aux environnements insulaires a entraîné une sélection positive des gènes favorisant la résistance aux périodes de disette. Mais avec l'arrivée de l'alimentation occidentale et le changement des modes de vie, cette qualité est devenue un problème : elle a favorisé l'obésité dans ces populations.

L'étude a montré que, comme toutes les populations du monde, hors celles d'Afrique, les Océaniens portent des gènes néandertaliens (comme *OSBPL10*). Mais les données recueillies portent également des traces de plusieurs métissages anciens entre les populations asiatiques et les Dénisoviens (cousins orientaux des Néandertaliens), en Asie continentale orientale d'abord, puis en Asie du Sud-Est, ainsi qu'entre Papous et Austronésiens. Dans leur progression vers l'Océanie, les groupes d'*Homo sapiens* ont bénéficié de quatre flux géniques provenant soit des Dénisoviens eux-mêmes, soit de groupes qui leur étaient liés.

© Shutterstock.com/Jose Gil

Il y a environ 46 000 ans, des populations ancestrales de celles de l'Océanie proche (Papouasie-Nouvelle-Guinée, archipel Bismarck et îles Salomon) et des Agtas des Philippines (des Négritos) ont reçu en Asie orientale un premier flux de gènes provenant d'un groupe génétiquement distant des Dénisoviens de l'Altaï, qu'ils ont plus tard transmis aux Océaniens. Il semble que les ancêtres des Agtas des Philippines aient aussi reçu un deuxième flux génique d'un autre groupe dénisovien.

Il y a environ 21 000 ans, en Asie orientale, une population ancestrale des Océaniens actuels a reçu un troisième flux de gènes d'un groupe cette fois proche des Dénisoviens de l'Altaï.

Finalement, un autre flux génique – spécifique aux Papous – serait issu d'un groupe dénisovien plus lointain, lié aux Dénisoviens de l'Altaï, il y a quelque 25 000 ans.

« Nous avons été surpris de constater que, contrairement à l'héritage génétique néandertalien, très homogène entre les 20 groupes étudiés (environ 2,5 %), l'héritage génétique dénisovien varie considérablement d'une population à l'autre : de presque 0 % à Taïwan et aux Philippines, il monte jusqu'à 3,2 % en Papouasie-Nouvelle-Guinée et au Vanuatu », commente Lluis Quintana-Murci.

Les chercheurs ont constaté en outre que les quatre flux de gènes dénisoviens ont apporté presque exclusivement des mutations bénéfiques, liées à la régulation de la réponse immunitaire. En d'autres termes, les populations dénisoviennes d'Asie du Sud-Est, qui étaient depuis longtemps adaptées à leur environnement équatorial, ont transmis aux premiers *Homo sapiens* parvenus dans la proche Océanie des traits immunitaires les aidant à mieux résister aux nombreux agents infectieux présents dans les forêts tropicales humides. Ces humains modernes les ont ensuite transmis aux populations austronésiennes en expansion.

Résultat : ces mutations se rencontrent aujourd'hui dans toute l'Océanie, et leur nombre témoigne de « la grande diversité génétique des hommes archaïques qu'étaient les Dénisoviens », souligne Lluis Quintana-Murci. ■

**François Savatier**

J. Choin *et al.*, *Nature*, vol. 592, pp. 583-589, 2021



# Le coût économique des invasions biologiques

**Les invasions biologiques auraient coûté près de 1 300 milliards d'euros sur la période 1970-2017, selon une étude menée sous la houlette de Christophe Diagne et Franck Courchamp, du laboratoire Écologie, systématique et évolution, à Orsay. Décryptage.**



Propos recueillis par Théo Torcq

CHRISTOPHE DIAGNE
écologue à l'université Paris-Saclay

**Pourquoi s'intéresser au coût des invasions biologiques ?**

Une invasion biologique est le processus par lequel une espèce, animale ou végétale, est transportée de son environnement d'origine jusqu'à un autre d'où elle était absente. On qualifie une telle espèce d'« exotique » dans la région envahie. Et elle est dite « envahissante » lorsqu'elle parvient à s'établir, stabiliser sa population, puis proliférer, avec des impacts sanitaires, socioéconomiques et écologiques parfois extrêmement délétères sur la zone touchée. Ces invasions sont l'une des plus grandes menaces connues pour la biodiversité. Aussi la mobilisation scientifique est-elle importante autour de ce phénomène. Et il est nécessaire que l'ensemble de la société s'y intéresse, car c'est l'humain qui transporte ces espèces, de façon directe – par transport mécanique (souvent le bateau ou l'avion) – ou indirecte – *via* le réchauffement climatique. Or on est beaucoup plus écouté quand on parle d'argent.

**Comment avez-vous procédé pour évaluer ce coût ?**

Les coûts sont très divers. Nous avons choisi de les séparer en deux catégories : les coûts directs ou indirects des dégâts causés par les espèces envahissantes (coûts de santé dus aux maladies transmises, ravages de cultures, dégâts causés aux infrastructures…), et les coûts de gestion – l'argent investi pour lutter contre l'invasion d'une espèce, la contrôler ou réduire son impact.

Nous avons construit une base de données, InvaCost, où nous avons compilé des milliers de coûts publiés dans la littérature scientifique. Cette base n'est pas exhaustive, même si on la met régulièrement à jour, mais elle propose une homogénéisation de l'information ainsi récupérée. Dans un second temps, nous avons filtré ces données afin de ne conserver que les plus robustes et éliminer les biais potentiels.

Sur cette couverture de presque cinquante ans, nous avons ainsi montré qu'au fil des ans le coût moyen annuel a constamment progressé : autour de 1 milliard d'euros dans les années 1980 d'après les données brutes collectées, il pourrait avoir dépassé les 160 milliards d'euros pour la seule année 2017 selon nos estimations, soit 20 fois les budgets combinés de l'OMS et du secrétariat de l'ONU cette même année. Et ce coût est largement sous-estimé.

**Comment expliquer cette augmentation ?**

D'abord, avec l'intensification des activités et déplacements humains, il y a plus d'occasions d'invasions biologiques. Ensuite, de plus en plus d'études s'intéressent à leur coût économique. Davantage de coûts sont donc rapportés. Et l'on ne présente ici que le sommet visible de l'iceberg. Depuis, nous avons collecté des données dans 15 langues différentes et non plus seulement en anglais, ce qui a déjà augmenté le coût total de 15 %. Par ailleurs, tous les impacts des espèces exotiques envahissantes ne sont pas monétisés, d'où une sous-estimation des coûts de ces invasions. En plus, il existe un biais taxonomique et géographique important dans les données disponibles : elles proviennent principalement des pays développés. Enfin, il existe un délai entre le moment où une invasion a lieu et celui où elle est rapportée.

**Quel impact espérez-vous avoir ?**

Déjà, nous espérons une prise de conscience du grand public et des autorités. Ensuite, il faut que naisse l'action. Au vu des impacts des espèces envahissantes, de la difficulté de « s'en débarrasser » ou d'en limiter les effets, l'accent devrait être mis sur la prévention (surveillance des points d'entrée, opérations de biosécurité…) plutôt que sur la réaction. ■

C. Diagne *et al.*, *Nature*, vol. 592, pp. 571-576, 2021

GÉOSCIENCES

# LA FONTE DES GLACIERS ACCÉLÈRE

**Une cartographie complète à l'échelle de la planète dresse un bilan inquiétant : depuis 2000, les glaciers perdent en moyenne 267 milliards de tonnes de glace par an.**

Le recul des glaciers et leur perte de masse à cause du réchauffement climatique sont des faits confirmés depuis de nombreuses années. En revanche, l'ampleur du phénomène restait entachée d'incertitudes importantes, faute de mesures assez précises et exhaustives. Grâce à une vaste étude portant sur la quasi-totalité des 220 000 glaciers de la planète, l'équipe menée par Romain Hugonnet et Étienne Berthier, glaciologues au laboratoire Legos, à Toulouse, a dressé le bilan le plus complet à ce jour.

Pour mener à bien ce projet, les chercheurs ont utilisé la collection d'images de l'instrument Aster embarqué à bord de *Terra*, un satellite de la Nasa. Ils ont ainsi suivi l'évolution de tous les glaciers du globe sur vingt ans, du 1er janvier 2000 au 31 décembre 2019. L'intérêt de l'instrument Aster est qu'il est équipé de deux caméras permettant une vision stéréoscopique des reliefs. Les chercheurs ont ainsi créé des modèles numériques des glaciers avec une résolution horizontale d'environ 30 mètres. Pour garantir la précision des mesures, l'équipe a comparé leurs modèles avec des données provenant d'autres observations satellitaires et aéroportées. Au total, avec en moyenne 39 images par site prises sur les deux décennies, l'ensemble des clichés couvre une superficie 20 fois supérieure à celle des continents de la Terre !

Les résultats sont spectaculaires… et inquiétants. Entre 2000 et 2019, les glaciers, dans leur globalité, ont perdu en moyenne 267 milliards de tonnes de glace par an. Cette valeur est 33 % plus élevée que les pertes estimées dans d'autres études pour la calotte groenlandaise, et au moins le double de celle de l'Antarctique. Les chercheurs ont également constaté une accélération de la tendance. Entre 2000 et 2004, la baisse moyenne était de 227 milliards de tonnes. Elle est passée à 298 milliards sur la période 2015-2019.

En examinant les résultats à l'échelle locale, la dynamique est très contrastée. Sept régions représentent à elles seules près de 83 % des pertes de masse : l'Alaska, la périphérie du Groenland, les régions arctiques nord et sud du Canada, la périphérie de l'Antarctique, la chaîne de l'Himalaya et la partie sud des Andes. En termes d'évolution, la vitesse de fonte a augmenté dans la majorité des sites. Les chercheurs ont néanmoins constaté quelques contre-exemples. En Islande, mais également sur la côte est du Groenland et la Scandinavie, la fonte a été plus faible sur la période 2010-2019 que sur la décennie précédente.

Ces variations régionales sont liées à des conditions météorologiques exceptionnelles. Par exemple, depuis 2010, les Andes centrales ont souffert de sécheresses extrêmes qui ont provoqué un déclin important des glaciers. À l'inverse, sur la même période, la partie nord de l'Atlantique a connu des températures basses et une pluviométrie élevée qui ont limité la fonte des glaciers en Islande, en Scandinavie et dans l'est du Groenland. La variabilité locale et décennale serait contrôlée par les précipitations, mais la dynamique globale de l'accélération de la perte de masse des glaciers est directement liée à la hausse des températures. ■

**Sean Bailly**



Le Klinaklini, avec ses 500 kilomètres carrés, est le plus grand glacier de l'ouest du Canada. Il a aussi donné son nom à l'ordinateur de l'université de Colombie-Britannique du Nord, qui a été utilisé pour traiter les données enregistrées par la caméra Aster. Le projet correspond à l'équivalent d'un an de calcul.

**EN CHIFFRE**

**21 %**

**En supposant que toute l'eau de fonte des glaciers finit dans les océans, le déclin des glaciers a contribué à élever de 0,74 millimètre par an le niveau des mers, soit 21 % de la hausse observée depuis 2000. Le reste est dû à la dilatation thermique des océans qui se réchauffent et à la fonte des calottes antarctique et groenlandaise.**

R. Hugonnet *et al.*, *Nature*, vol. 592, pp. 726-731, 2021

© Brian Menounos

## EN BREF

### 5 200 tonnes de micrométéorites

La Terre rencontre régulièrement des poussières de comètes et d'astéroïdes. Une partie de ces micrométéorites atteint le sol. Au cours de six expéditions menées en Antarctique depuis vingt ans, l'équipe dirigée par Jean Duprat, chercheur du CNRS, a collecté ces particules (entre 30 et 200 micromètres) et estimé que, chaque année, 5 200 tonnes de poussière extraterrestre arrivent sur la planète. C'est plus que la contribution des objets de grande taille comme les météorites.

*Earth Planet. Sci. Lett.*, 15 avril 2021

### Recensement chez les T. rex

Combien de ces dinosaures iconiques ont vécu sur Terre ? Pour le savoir, Charles Marshall, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont appliqué une méthode utilisée sur les espèces actuelles, qui prend en compte la masse d'un individu et la taille de la zone occupée par cette espèce. Résultat : à un instant donné, environ 20 000 individus foulaient la terre. En comptant environ 127 000 générations, on arrive à un total de 2,5 milliards de *Tyrannosaurus rex*.

*Science*, 16 avril 2021

### Une espèce de café redécouverte

Le marché du café repose sur deux espèces, l'*arabica* et le *robusta*, parmi les 124 du genre *Coffea*. Delphine Mieulet, du Cirad, à Montpellier, et ses collègues se sont intéressés à *Coffea stenophylla*, une espèce sauvage d'Afrique de l'Ouest qui a quasiment disparu. Au goût, ce café serait comparable à un *arabica* haut de gamme. Autre intérêt dans le contexte du réchauffement climatique : ce caféier s'adapte à une température annuelle moyenne de 25 °C, contre 19 °C dans le cas de l'*arabica*.

*Nature Plants*, 19 avril 2021

© Shutterstock.com/Kai Brosinski - Patrick Cordier *et al.*

## ENVIRONNEMENT

# LE PLOMB, NÉFASTE AUX ABEILLES

Si le rôle des produits agrochimiques dans le déclin des insectes pollinisateurs est aujourd'hui bien identifié, il n'en est pas de même pour d'autres polluants tels que le plomb. Avec leurs collègues, Coline Monchanin et Mathieu Lihoreau, du Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse, ont étudié l'impact du plomb sur les capacités d'apprentissage et de mémoire des abeilles domestiques, grâce auxquelles ces insectes identifient les plantes les plus productives et adaptent leur butinage au fil des saisons et des floraisons.

Les chercheurs ont testé les performances d'abeilles de ruches disposant, à la place de nectar, d'eau sucrée pure ou additionnée de plomb à deux concentrations différentes, représentatives des conditions réelles et largement inférieures aux limites réglementaires pour les eaux d'irrigation. Les tests ont montré que l'exposition régulière au plomb à la concentration la plus élevée des deux (0,75 milligramme par litre) produisait une perte de mémoire olfactive et, surtout, un manque de flexibilité dans l'apprentissage de nouvelles odeurs.

Les biologistes ont aussi constaté que la tête des abeilles exposées au plomb diminuait de taille, ce qu'ils ont pu corréler à l'accumulation de plomb dans leur organisme. Et en testant des abeilles issues de ruches libres, ils ont confirmé le lien de cause à effet entre taille de la tête et performances cognitives.



Pour butiner avec efficacité, l'abeille doit repérer les fleurs nourricières, qui diffèrent selon la saison. Or l'exposition au plomb réduit ses capacités d'apprentissage en la matière.

D'après ces résultats, l'exposition au plomb affecterait, dans la nature, la capacité des abeilles à délaisser les fleurs ne produisant plus nectar et pollen et à se tourner vers celles qui s'épanouissent. À long terme, c'est la survie de la colonie qui pourrait être compromise, comme elle l'est face aux pesticides. ■

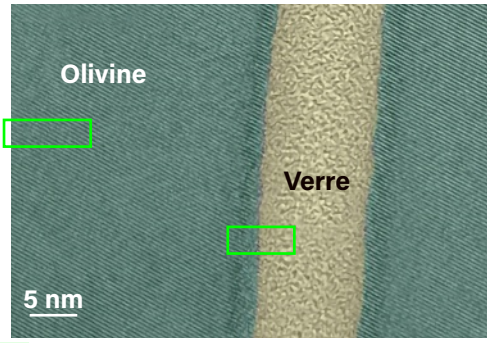
**Isabelle Bellin**

C. Monchanin *et al.*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 212, article 112008, 2021

## GÉOSCIENCES

# LE LUBRIFIANT DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

À une certaine profondeur du manteau terrestre supérieur, la viscosité des roches, c'est-à-dire leur capacité à se déformer pour s'écouler, est divisée par 10 000. Avec son équipe franco-belge, Patrick Cordier, de l'université de Lille, a mené des expériences sur l'olivine, le minéral constituant au moins 60 % du manteau terrestre supérieur, pour comprendre cette chute de la viscosité, essentielle dans le fonctionnement de la tectonique des plaques. Les chercheurs ont observé au microscope électronique la déformation de ses grains cristallins aux pression et température régnant à la profondeur où la viscosité s'effondre. Ils constatent qu'une fine peau de verre d'olivine se forme à l'interface des grains déformés. Cette couche épaisse de quelques nanomètres d'olivine amorphe, c'est-à-dire non cristalline, est bien plus déformable que l'olivine cristalline. Elle agirait comme un lubrifiant et rendrait ainsi possible le déplacement des plaques tectoniques sur les roches mantelliques visqueuses sous-jacentes. ■




Aux température et pression régnant à une profondeur de l'ordre de 100 kilomètres, une couche vitreuse se forme à la surface des grains cristallins d'olivine.

**F. S.**

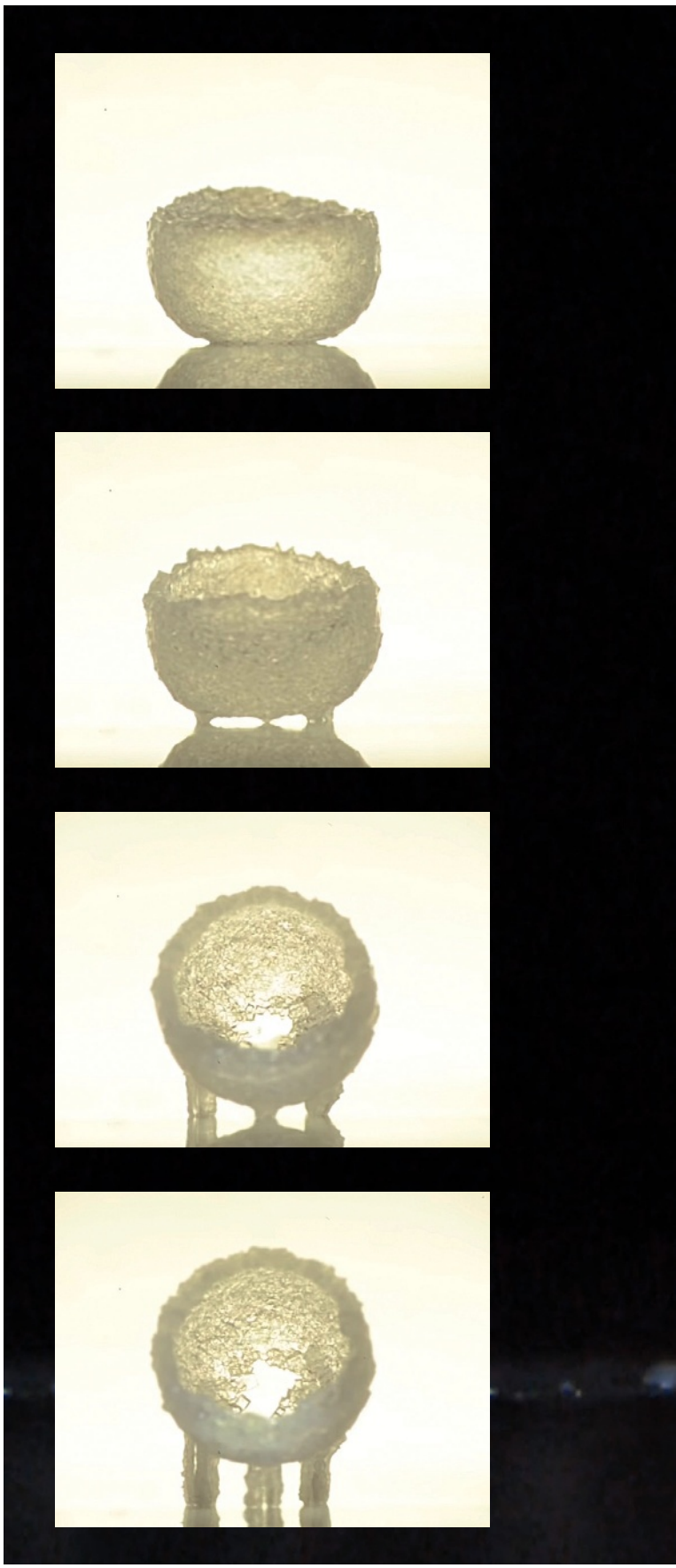
V. Samae *et al.*, *Nature*, vol. 591, pp. 82-86, 2021

# ÉLÉPHANTS ET DROÏDES DE SEL

Que se passe-t-il lorsque vous déposez une goutte d'eau salée sur une surface superhydrophobe chauffée ? La goutte garde sa géométrie quasi sphérique à cause des propriétés de la surface et commence à s'évaporer. Elle forme alors progressivement une coquille cristalline, les cristaux de sel germant de préférence à l'interface de l'eau et de l'air. Le résultat est esthétique, mais n'a rien d'inattendu. Cependant, Samantha McBride, Henri-Louis Girard et leur directeur de thèse Kripa Varanasi, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, ont observé un phénomène bien plus étonnant. Dans certaines conditions, le globe cristallin s'élève soudainement, perché sur des pattes de sel (*comme sur la séquence verticale ci-contre*). Les chercheurs ont surnommé leurs structures des « créatures de sel » du fait de leur ressemblance avec des crabes, des éléphants ou même des « droïdes » (*ci-contre à droite*, en référence à certains robots de la saga *Star Wars*).

L'équipe a analysé le processus en jeu. L'eau contenue dans la goutte qui se cristallise s'écoule vers le bas sous l'effet de la pesanteur. Au contact de la plaque chaude (entre 60 °C et 100 °C), elle s'évapore en ne laissant que des cristaux de sel qui amorcent la formation des colonnes. Le liquide continue de s'écouler par ces tubes creux et les alimente en sel par la base. La croissance se poursuit jusqu'à l'évacuation complète du liquide. ■

**S. B.**



S. A. McBride *et al.*, *Science Advances*, vol. 7, article eabe6960, 2021



© S. A. McBride et al., Science Advances, 2021/MIT

NEUROSCIENCES

# VERS UN TRAITEMENT DE LA MALADIE DE HUNTINGTON ?

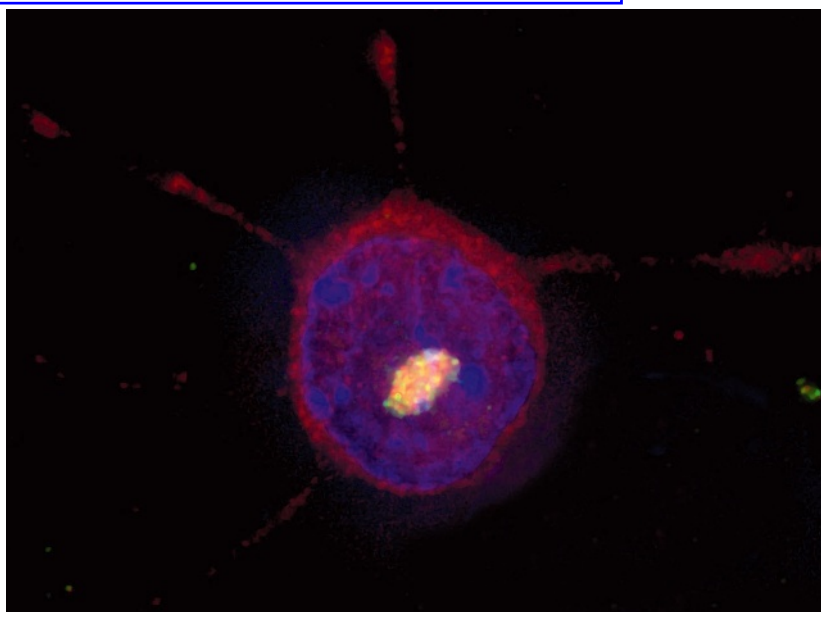
**Une équipe française a trouvé une molécule capable de protéger les neurones contre la maladie de Huntington et de diminuer les symptômes de souris malades.**

Les personnes atteintes de la maladie de Huntington développent les premiers signes de la pathologie entre 30 et 50 ans : mouvements incontrôlés, mais aussi troubles psychiatriques et cognitifs, notamment des symptômes anxiodépressifs, le tout s'aggravant avec le temps et aboutissant au décès en moins de vingt ans. Aucun traitement curatif n'existe. Cependant, Amandine Virlogeux, de l'université Grenoble-Alpes, du CHU Grenoble-Alpes et de l'Inserm, et ses collègues viennent d'identifier un médicament potentiel, la molécule ML384.

La maladie de Huntington est une maladie neurodégénérative rare et héréditaire, liée à la mutation d'un seul gène qui code une protéine nommée « huntingtine ». Quand cette dernière est mutée, elle n'assure plus correctement le transport des vésicules intracellulaires, notamment de celles contenant une molécule cruciale, le BDNF (pour *brain-derived neurotrophic factor*). Cette substance est un facteur nourricier des neurones qui assure leur survie et le bon fonctionnement de leurs connexions, notamment entre le cortex cérébral et le striatum, des régions impliquées entre autres dans le contrôle de l'humeur et des mouvements. Le dysfonctionnement et la mort des neurones de ces deux structures du cerveau, consécutifs au manque de BDNF, provoquent alors la panoplie des symptômes observés chez les patients. L'objectif des chercheurs était donc de restaurer ce transport de vésicules.

C'est chose faite… pour l'instant, chez des souris atteintes de la maladie de Huntington. Dans cette étude, les chercheurs ont analysé toutes les autres protéines des vésicules transportant le BDNF et identifié une enzyme, nommée APT1, qui est suractivée quand la huntingtine est mutée et qui diminue la palmitoylation des protéines insérées dans la membrane de ces vésicules, c'est-à-dire l'ajout d'acides gras à ces protéines. Ce défaut de palmitoylation nuit au transport des vésicules le long des neurones.

Ainsi, les chercheurs ont montré qu'en restaurant la palmitoylation, grâce à un composé nommé ML384 qui bloque APT1, ils relançaient le transport des vésicules de BDNF chez les souris malades. Avec, pour conséquence, une diminution de la mort de leurs neurones et une disparition de leurs symptômes moteurs et cognitifs, les rongeurs retrouvant des comportements proches de ceux des animaux non malades. Et ce sans effet secondaire toxique. Les chercheurs ont d'ailleurs montré que ce traitement active aussi le transport du BDNF le long de neurones corticaux humains cultivés *in vitro*.



Dans un neurone du striatum, la protéine huntingtine mutante *(en rouge)*, qui provoque la maladie de Huntington, s'accumule dans le noyau *(en bleu)* pour former un agrégat composé de huntingtine et d'autres protéines *(en jaune)*.

C'est la première fois que l'on identifie une molécule neuroprotectrice contre la maladie de Huntington. Potentiellement, elle épargnerait certains neurones de la dégénérescence et pourrait ralentir la progression de la pathologie. Sachant qu'aujourd'hui, en France, 6000 personnes ont des symptômes de la maladie et 12000 portent le gène qui les conduira inéluctablement à développer la pathologie dans les années à venir, il s'agit d'un résultat essentiel, porteur d'espoir pour tous les malades. Reste à prouver l'innocuité et l'efficacité de ML384 chez l'humain. Ces études sont en cours. ■

**Bénédicte Salthun-Lassalle**

A. Virlogeux *et al.*, *Science Advances*, vol. 7(14), article eabb0799, 2021

© Frédéric Saudou

BIOCHIMIE

## CAPTEURS DE L'ASTRINGENCE

Lors de la dégustation d'un vin rouge, la sensation de sécheresse dans la bouche est caractéristique de l'astringence. Celle-ci est liée à la présence de certaines molécules végétales, les tanins. Les récepteurs sensoriels et les mécanismes moléculaires en jeu ne sont cependant pas bien connus. On invoquait généralement les protéines salivaires. Francis Canon, de l'Inrae, et ses collègues proposent une nouvelle hypothèse. Ils se sont intéressés à la protéine MUC1, dont l'une des deux parties est ancrée dans la membrane des cellules de la muqueuse orale. Lors de l'interaction des tanins avec MUC1, les deux parties se détacheraient. Il s'ensuivrait une chaîne de réactions aboutissant à la sensation d'astringence. ■

**S. B.**

F. Canon *et al.*, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 69(13), pp. 3822-3826, 2021

BIOLOGIE

## DES PLEUROTES CARNIVORES

Quand on les voit bien campés sur leur pied, on n'imagine pas que certains champignons puissent être des prédateurs. Pourtant, certains d'entre eux sont connus pour leur capacité à paralyser de petits animaux et à les digérer. En général, la paralysie prend quelques heures. Or, quand il est en manque d'azote, le pleurote en huître (*Pleurotus ostreatus*) peut s'attaquer à des vers nématodes pour absorber leurs nutriments et les paralyse en quelques minutes. Ching-Han Lee, de l'Académie chinoise de Taipei, à Taïwan, et ses collègues ont précisé ce mécanisme mal connu. Ils ont montré que le contact des cils du nématode *Caenorhabditis elegans* avec les filaments du champignon déclenche un afflux important d'ions calcium au niveau des muscles du pharynx et de la tête du ver. Ces ions entraînent une hypercontraction des muscles de la tête et un arrêt de l'activité du pharynx de la victime. ■

**Nicolas Butor**

C.-H. Lee *et al.*, *PNAS*, vol. 117(11), pp. 6014-6022, 2020

PALÉONTOLOGIE

# LES AILES DU REQUIN-AIGLE



Le fossile du requin *Aquilolamna milarcae* découvert dans les calcaires de Vallecillo, au Mexique. Il avait une envergure de près de 1,90 mètre, pour une longueur de 1,65 mètre.

Les requins et les raies parcourent les mers depuis des centaines de millions d'années et forment aujourd'hui la sous-classe des élasmobranches. Si la plupart d'entre eux sont des prédateurs, certains se nourrissent de plancton en nageant lentement, la gueule grande ouverte. C'est le cas des raies manta, des requins-baleines ou des requins-pèlerins. Romain Vullo, de l'université de Rennes, et ses collègues se sont penchés sur un étrange fossile datant du Crétacé, *Aquilolamna milarcae*, une nouvelle espèce de requin qui présente des similarités avec les raies manta.

Datant de 93 millions d'années, ce fossile a été découvert dans le nord-est du Mexique. Au bout de sa queue, sa nageoire caudale développée et la forme de certaines vertèbres indiquent que c'était probablement un requin de haute mer. Les chercheurs n'ont pas retrouvé de dents dans sa large gueule, mais ils supposent qu'elles étaient très petites. Cela indiquerait qu'*Aquilolamna* se nourrissait de plancton, comme le requin-pèlerin. Cependant, ce fossile s'en distingue par une caractéristique encore jamais observée chez les requins : des nageoires pectorales hypertrophiées, minces mais très allongées, qui devaient lui servir à se stabiliser. Cela lui a valu d'être aussi nommé « requin-aigle ».

Aujourd'hui, parmi les élasmobranches, on distingue donc deux catégories de mangeurs de plancton : les fusiformes, qui se propulsent grâce à leur nageoire caudale, comme les requins-baleines et pèlerins, et ceux qui « battent des ailes » avec leurs grandes nageoires pectorales, comme les raies manta. Le requin-aigle vivait 30 millions d'années avant l'apparition des raies manta. Ces deux élasmobranches bien différents présentent donc une convergence évolutive vers des nageoires pectorales hypertrophiées. ■

**Théo Torcq**

R. Vullo *et al.*, *Science*, vol. 371, pp. 1253-1256, 2021

© Wolfgang Stinnesbeck

PALÉOGÉNÉTIQUE

# PREMIERS EUROPÉENS : UNE PARENTÉ EXTRÊME-ORIENTALE

Deux équipes de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire, à Leipzig, en Allemagne, viennent d'étudier les génomes de six des tout premiers *Homo sapiens* européens. Celle de Mateja Hajdinjak a étudié l'ADN contenu dans cinq fossiles trouvés dans la grotte bulgare de Bacho Kiro, datés par le radiocarbone entre 45930 et 42580 ans avant le présent. Leurs génomes ne révèlent pas de proximité génétique avec les chasseurs-cueilleurs européens ultérieurs, les Aurignaciens et les Gravettiens; en revanche, ils sont plus proches des chasseurs-cueilleurs extrême-orientaux et amérindiens anciens et de leurs descendants.

L'équipe de Kay Prüfer, elle, a séquencé le génome entier contenu dans un crâne *sapiens* découvert dans les années 1950 dans la grotte tchèque de Zlatý kůň. Pour dater ce crâne hautement contaminé, les chercheurs ont réalisé une modélisation bayésienne de l'ascendance de l'ADN qu'il contient, ce qui lui donne au moins 43000 ans, voire 45000 ans. Il a donc sensiblement le même âge que les fossiles de Bacho Kiro, mais aussi que les fossiles Oase 1, découvert en Roumanie, ou Ust'Ishim, trouvé en Sibérie centrale. L'ADN de Zlatý kůň s'avère lui aussi plus proche de celui des anciens chasseurs-cueilleurs extrême-orientaux que de celui des chasseurs-cueilleurs européens ultérieurs, ce qui avait été déjà constaté pour Oase 1 et Ust'Ishim.



Le crâne de la femme de Zlatý kůň, membre de la première population européenne *sapiens*.

Une conclusion s'impose: les individus européens de Bacho Kiro, de Peștera cu Oase et de Zlatý kůň, et l'individu protosibérien Ust'Ishim relèvent d'une première vague *sapiens* qui a progressé vers le nord il y a 50000 à 40000 ans à partir du Proche-Orient, avant la séparation des Eurasiens occidentaux et des Eurasiens orientaux. Cette première vague ne nous a pas laissé d'héritage génétique. ■

**F. S.**

M. Hajdinjak *et al.*, *Nature*, vol. 592, pp. 253-257, 2021 ; K. Prüfer *et al.*, *Nat. Ecol. Evol.*, en ligne le 7 avril 2021

BIOLOGIE CELLULAIRE

# UNE SYMBIOSE INÉDITE

L'origine de la mitochondrie est un exemple classique d'endosymbiose. Il y a plus de 1,7 milliard d'années, une archée (un type d'organisme unicellulaire) aurait intégré une bactérie, qui aurait évolué en un organite produisant de l'énergie pour la cellule à partir de réactions fondées sur le dioxygène. Plus tard, chez certains organismes vivant dans des milieux pauvres en dioxygène, les mitochondries ont évolué en une structure, l'hydrogénosome, qui fournit de l'énergie par fermentation. Ce processus produit de l'hydrogène, qui, en s'accumulant, devient toxique pour l'organisme. Or en étudiant un eucaryote cilié prélevé dans les eaux profondes et dépourvues de dioxygène du lac suisse de Zoug, Jon Graf, de l'institut Max-Planck de microbiologie marine, en Allemagne, et ses collègues ont découvert que cet organisme unicellulaire héberge des endosymbiotes d'origine bactérienne. Ces derniers fournissent de l'énergie à leur hôte en utilisant l'hydrogène de l'hydrogénosome et le nitrate du milieu aquatique. Un mécanisme inédit de respiration fondé sur le nitrate, à la place de l'oxygène. ■

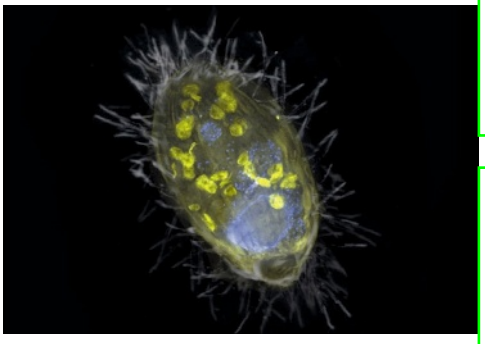


Image composite de l'organisme cilié hôte et de ses endosymbiotes bactériens *(en jaune)*.

**William Rowe-Pirra**

J. S. Graf *et al.*, *Nature*, vol. 591, pp. 445-450, 2021

## EN BREF

### Alternance de climats sur Mars

Grâce à sa position privilégiée sur le sol martien, le rover *Curiosity* a photographié et analysé à distance les roches sur le flanc du mont Sharp, un relief de plusieurs kilomètres de hauteur. La superposition de différentes strates d'argiles lacustres, de dépôts éoliens arides et de dépôts typiques d'inondations fluviales suggère que cette région de la planète a connu une alternance de périodes humides et sèches avant de s'assécher complètement il y a 3 milliards d'années.

*Geology*, 8 avril 2021

### Des pâtes transformeuses

Les différentes variétés de pâtes rivalisent d'originalité dans leurs formes. L'inconvénient principal est que certaines formes prennent beaucoup de place. Pour réduire la consommation d'emballages, Ye Tao, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues ont conçu des pâtes plates qui prennent leur forme au moment de la cuisson. Leur secret : des sillons tracés à leur surface donnent naissance à une courbure quand la pâte cuit. Selon le motif gravé, la pâte prend différentes formes.

*Science Advances*, 5 mai 2021

### La population d'Angkor estimée

Seuls les édifices religieux de la cité d'Angkor, au Cambodge, nous sont parvenus. Il était donc difficile d'estimer la population de cette ville. Sarah Klassen, de l'université de Colombie-Britannique, et ses collègues ont construit un modèle démographique s'appuyant sur des décennies de fouilles archéologiques, les données lidar récentes et des algorithmes d'intelligence artificielle. À son apogée, au XIIIe siècle, la cité d'Angkor aurait hébergé entre 700 000 et 900 000 habitants.

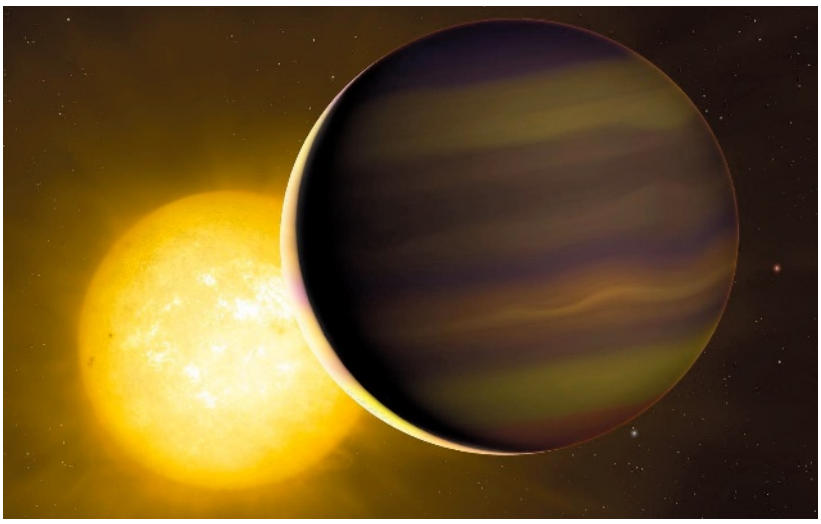
*Science Advances*, 7 mai 2021

En haut : © Martin Frouz ; en bas : © Institut Max-Planck de microbiologie marine/S. Ahmerkamp

# UNE GÉANTE GAZEUSE VOYAGEUSE

Si plus de quatre mille exoplanètes sont aujourd'hui répertoriées avec certitude, ce champ d'exploration immense recèle encore de très nombreuses surprises. Paolo Giacobbe, de l'observatoire astronomique de Turin, en Italie, et ses collègues viennent d'étudier la planète géante gazeuse HD 209458 b et l'étoile autour de laquelle elle gravite, et ont pu reconstituer une partie de leur histoire.

En analysant le spectre de la lumière de l'étoile qui traverse l'atmosphère de l'exoplanète, où certaines longueurs d'onde bien précises sont absorbées en fonction de la composition du gaz, les chercheurs ont détecté la présence de vapeur d'eau ($H_2O$), d'ammoniac ($NH_3$) et de quatre molécules carbonées: le monoxyde de carbone (CO), le méthane ($CH_4$), le cyanure d'hydrogène (HCN) et l'acétylène ($C_2H_2$). Ils ont alors calculé le rapport d'abondance carbone/oxygène. Si l'exoplanète s'était formée à sa position actuelle, elle devrait avoir une composition comparable à celle de son étoile, avec un rapport carbone/oxygène de l'ordre de 0,5. Or le rapport est proche de 1! D'après les chercheurs, ce résultat indique que la géante gazeuse s'est formée dans le disque protoplanétaire à une grande distance de son étoile, autour de 750 millions de kilomètres, contre 7 millions de kilomètres aujourd'hui. La géante gazeuse aurait ainsi entrepris un grand voyage des confins vers le centre de son système, au plus près de son étoile. Reste à comprendre l'origine de cette migration. ■



Vue d'artiste de l'exoplanète HD 209458 b et, dans le fond, de son étoile. Ce Jupiter chaud aurait migré des confins de son système stellaire pour se rapprocher à l'extrême de son étoile hôte

**Lucas Gierczak**

P. Giacobbe *et al.*, *Nature*, vol. 592, pp. 205-208, 2021

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

PORTONS LA VOIX DE LA NATURE

mnhn.fr

Découvrez les ***Manifestes du Muséum,*** une collection de **4 ouvrages** qui offrent un éclairage **scientifique** sur des sujets **d'actualité**.

Écoutez ***Pour que nature vive,*** 12 podcasts pour **comprendre le vivant.**

POUR LE FUTUR DE NOTRE PLANÈTE, **PARTAGEZ NOTRE ENGAGEMENT !**




POUR LA SCIENCE

© Université de Warwick/Mark Garlick




## MATHÉMATIQUES

### LES MATHS FONT LEUR CINÉMA

Jérôme Cottanceau

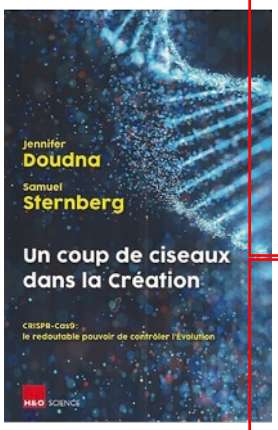
**Dunod, 2021**
**256 pages, 19,90 euros**

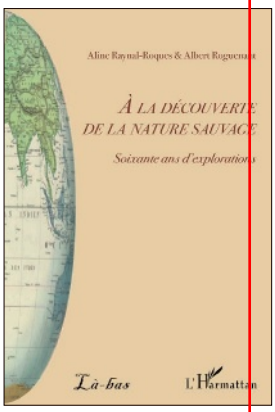
Quatorze films où les mathématiques occupent une place importante font l'objet des quatorze chapitres de ce plaisant livre. L'auteur décrit la trame de l'histoire et ses personnages, mais c'est pour trouver des prétextes à des digressions sur certaines des questions mathématiques évoquées dans le film. Cette façon de s'y prendre rend le texte vivant, et découle clairement de l'entraînement de l'auteur, rompu à l'écriture de blogs.

Par exemple, dans le chapitre sur *Les Figures de l'ombre* (*Hidden Figures*), le film retraçant le parcours de trois mathématiciennes afro-américaines ayant travaillé pour la Nasa dans les années 1950-1960, on trouve une digression sur la méthode d'Euler. Dans le film, l'une des mathématiciennes propose d'utiliser cette méthode pour calculer précisément le point d'arrivée de la capsule dans l'océan. Il s'agit, plus précisément, d'utiliser le schéma d'Euler pour résoudre de façon approchée l'équation différentielle à laquelle obéit la trajectoire de la capsule. L'auteur établit le lien entre la stabilité des méthodes numériques de résolution en fonction du pas de temps ; cela l'amène à expliquer que le schéma d'Euler est une méthode d'ordre 1, mais qu'il vaudrait mieux utiliser le schéma de Runge-Kutta, qui est d'ordre 4, ce qui correspond au livre consulté par la mathématicienne de la Nasa. Au passage, les lecteurs apprennent beaucoup.

Quand on regarde un film, on est pris par l'action et l'on n'est guère capable de suivre en détail une logique scientifique. Voilà de quoi se rattraper pour les amateurs de mathématiques… et de cinéma !

**PIERRE BERTRAND**
Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand







## GÉNÉTIQUE

### UN COUP DE CISEAUX DANS LA CRÉATION

Jennifer Doudna et Samuel Sternberg

**H & O, 2020**
**352 pages, 23 euros**

CRISPR-Cas9, le redoutable pouvoir de contrôler l'évolution : ce sous-titre plante le décor. Le livre commence comme un roman, sur une plage de Hawaii. Soudain, au loin, apparaît une vague qui déferle très vite. Belle, majestueuse, la puissance de cette vague impressionne, terrifie. C'est avec cette image métaphorique que les auteurs ont choisi de nous faire entrer dans leur monde : celui de la recherche. Ils apprécient la beauté de la technique CRISPR-Cas9, qu'ils ont contribué à découvrir avec Emmanuelle Charpentier, récompensée avec Jennifer Doudna par le prix Nobel de chimie, mais ils voient aussi le revers de la médaille.

Scindé en deux parties, le livre évoque d'abord la bulle scientifique, le défi, la compétition qui entoure les chercheurs et leurs découvertes. Outre les enjeux scientifiques décrits progressivement, les auteurs nous font partager un quotidien. On comprend l'importance d'arriver à stabiliser le système CRISPR et de pouvoir le guider sur le génome. On se prend à rêver, nous aussi, de nouvelles approches médicales pour soigner des maladies génétiques.

Puis, très vite, les auteurs partagent leurs angoisses sur les possibilités qu'offre ce nouvel outil d'« édition » des gènes. On sombre du côté obscur des possibles. Comment les éviter ? Entre science et conscience, les auteurs témoignent de leur chemin de croix pour tenter de maîtriser les champs de recherche accessibles par cet outil. Ce récit témoigne aussi d'humanité. L'un des propulseurs de ces recherches a certes été la rencontre entre disciplines, mais avant tout la rencontre entre deux femmes. Comme le soulignent Jennifer Doudna et Samuel Sternberg, la recherche se fait par le biais de (bons) contacts humains, des rencontres d'abord individuelles avant d'être disciplinaires.

**CAROLINE COSTEDOAT**
Laboratoire ADES, université d'Aix-Marseille

## BOTANIQUE

### À LA DÉCOUVERTE DE LA NATURE SAUVAGE

Aline Raynal-Roques et Albert Roguenant

**L'Harmattan 2020**
**268 pages, 27,50 euros**

Les deux auteurs totalisent à eux deux plus de cent vingt années d'exploration des plantes du monde entier: Aline Raynal-Roques, professeure du Muséum, et Albert Roguenant, botaniste, sont déjà connus pour leurs nombreux ouvrages de vulgarisation. Ils livrent ici leurs mémoires et le *making of* de leur carrière. Car ils ont herborisé, séparément ou ensemble, un peu partout en Amérique, en Afrique et en Australie, en des temps sans internet ni GPS, avec de mauvaises cartes. Et dans des conditions de terrain d'autant moins faciles qu'ils ont, pour décrire et étudier des espèces nouvelles, poussé leurs pas dans les recoins les plus reculés.

Le livre est construit de façon étonnante, à laquelle le lecteur prend vite plaisir, tant elle traduit une profonde complicité: c'est un dialogue où l'un relance ou questionne l'autre. Le cheminement est souvent picaresque, avec des anecdotes piquantes (parfois au sens strict), et l'on ne s'ennuie jamais. On croise bien sûr des narrations botaniques, comme la façon dont l'orchidée canard d'Australie, *Paracaleana minor*, bouscule les insectes pour assurer sa pollinisation, ou encore la biologie des *Rhizophora* des mangroves. Le cadre humain et naturel est toujours présent et l'on découvre des populations et des traditions anciennes; on croise au passage des visages connus, comme celui de Théodore Monod.

Les auteurs racontent aussi comment la nature et l'humanité ont évolué, pas toujours pour le mieux. Ils ne sont cependant jamais dans le jugement; leur livre regorge de joie et d'humanité, presque de tendresse. La plume des auteurs ne traduit pas leurs âges. Elle est d'une grande vivacité quand ils pensent l'avenir: les derniers mots du livre sont pour cette humanité, une forme animale dont les auteurs voudraient qu'elle se réconcilie avec le monde naturel.

**MARC-ANDRÉ SELOSSE**
MNHN, Paris

## ENVIRONNEMENT-PHILOSOPHIE

### OÙ SUIS-JE ?

Bruno Latour

**Les Empêcheurs de penser en rond/La Découverte, 2021**
**192 pages, 15 euros**

Selon Bruno Latour, le Covid-19 offre une belle leçon aux confinés: il montre que l'on peut faire plusieurs fois le tour de la planète en cheminant de bouche en bouche et de main en main. Expliquer cela en rappelant qu'il prend l'avion serait s'enfoncer dans le réalisme, s'agissant d'un livre que son auteur voit avant tout comme un conte philosophique.

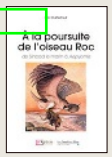
Sa façon pittoresque de décrire la circulation du virus n'est pas qu'un trait d'esprit. Elle a sa justesse. La «belle leçon» offerte aux confinés est, entre autres, qu'il faut repenser la notion de «local». Le mot «proche» ne veut pas dire «à quelques kilomètres», mais «qui m'attaque ou me fait vivre de manière directe». «Lointain» s'applique à ce dont je n'ai pas à me soucier tout de suite parce que ça n'a pas d'implication dans les choses dont je dépends. Si ces mots ne sont plus à prendre au sens de la distance spatiale, c'est parce que, de nos jours, le monde où l'on vit se superpose rarement au monde dont on vit.

D'où le titre surprenant du livre. La question «Où suis-je?» se pose maintenant qu'il ne s'agit plus d'aller de l'avant, comme la pensée moderne y incitait, mais d'explorer la Terre à l'aide de cette nouvelle conception du proche et du lointain. Ce n'est pas simple, car aucun être n'est séparé. Il n'y a pas de sens à parler de mon identité ou des limites de mon corps, alors que j'héberge des bactéries bien plus nombreuses que mes cellules et que je dépends de mille êtres avec lesquels je suis en interaction. Cerner ce qui est proche n'ira pas sans polémiques entre les entités concernées.

Je ne puis donner qu'un aperçu de ce livre foisonnant. Bruno Latour est un explorateur d'idées. Intrépide, déroutant, il joue du paradoxe, voire de la provocation. Certains lui en font grief. À mes yeux, son originalité stimulante l'emporte de beaucoup dans la balance.

**DIDIER NORDON**
Essayiste et mathématicien émérite

## ET AUSSI










**À LA POURSUITE DE L'OISEAU ROC**
**Eric Buffetaut**
**Le Cavalier Bleu, 2020**
**160 pages, 18 euros**

L'auteur, paléontologue de renom, s'intéresse depuis longtemps à la cryptozoologie. Il a constitué le dossier de l'oiseau Roc des contes orientaux, une sorte de rapace si géant qu'il aurait été capable d'emporter des éléphants. Marco Polo en a entendu parler et l'a décrit. Mais l'enquête, menée par les naturalistes depuis cent soixante-dix ans et narrée avec talent par Eric Buffetaut, conduit plutôt à identifier l'oiseau Roc à *Aepyornis*, une sorte d'autruche de Madagascar mesurant 3 à 3,5 mètres de haut.

**LES VACANCES DE MOMO SAPIENS**
**Mathias Pessiglione**
**Odile Jacob, 2021**
**336 pages, 23,90 euros**

Le libre arbitre existe-t-il, alors que nous sommes des animaux culturels pétris d'instincts ? L'objectif de ce livre est de voir si les neurosciences ont renouvelé la question, explorée par les philosophes depuis 2 500 ans. L'auteur, biologiste et psychologue à l'Inserm, examine comment le striatum (une structure dans le cerveau) intervient, comment la dopamine nous conditionne, comment nous fabriquons nos valeurs morales, comment les émotions nous submergent, pour finalement traiter de la question : « Y a-t-il un pilote dans mon crâne ? » La réponse des neurosciences n'est pas tranchée !

**NOS ANCÊTRES DANS LES ARBRES**
**Claudine Cohen**
**Seuil, 2021**
**328 pages, 23 euros**

La vie est diversité, celle de multiples embranchements. L'autrice suit les nombreuses métamorphoses de l'arbre des origines. Cela va de l'arbre généalogique jusqu'aux arbres phylogénétiques modernes, dont celui des mythes de l'humanité de Julien d'Huy, en passant par Charles Darwin et les arbres des théoriciens racistes de son époque. On suit ainsi la réflexion d'une observatrice réputée des sciences préhistoriques, qui nous offre l'occasion de contempler l'arborescence dessinée par la pensée préhistorienne elle-même.



La chronique de
GILLES DOWEK
Chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure de Paris-Saclay et membre du Comité national pilote d'éthique du numérique

# LE PROGRÈS TECHNIQUE FAVORISE-T-IL LA PAIX ?

**En facilitant la communication, internet contribue parfois à augmenter la tolérance et la paix dans nos sociétés.**



En Tunisie, en Biélorussie *(ci-contre)*, etc., les réseaux sociaux ont permis de contourner la censure pour organiser de vastes manifestations pacifiques contre le pouvoir.

Un progrès technique est une découverte qui nous permet de faire des choses que nous ne pouvions pas faire auparavant. Parce que certaines de ces choses sont mauvaises, le progrès technique n'implique pas la nécessité d'un progrès moral, mais parce que certaines sont bonnes, il en implique la possibilité. Les mêmes techniques permettent la bombe atomique et la tomographie par émission de positrons : c'est à nous de choisir ce que nous en faisons.

Depuis la fin des deux guerres mondiales, des guerres de décolonisation et de la guerre froide, nous vivons une époque de progrès moral sans doute sans précédent. Ainsi, seuls une poignée de pays ont encore des soldats qui combattent un autre État et rien ne nous paraît plus étranger que la morale du poète allemand Novalis qui écrivait, il y a deux siècles : « La guerre en elle-même [...] me paraît être œuvre de poésie. » Sur 197 pays, environ 140 ont aboli la peine de mort, en droit ou en pratique. Et nous commençons à trouver inadmissibles certaines formes de violence, que nous ne percevions naguère même pas : il aurait été difficile de sensibiliser un survivant de la bataille de Stalingrad à la question des conditions d'élevage des poulets, qui nous paraissent pourtant aujourd'hui intolérables.

> **Les jeux vidéo réduisent peut-être l'optimisme des va-t-en-guerre**

Ces dernières décennies étant par ailleurs celles d'un progrès technique sans doute aussi sans précédent, nous pouvons nous interroger sur les liens entre ces transformations, tout en gardant à l'esprit qu'il ne suffit pas que deux événements se déroulent en même temps pour que l'un soit la cause de l'autre.

Certains effets du développement de l'informatique ont un impact, plus ou moins évident, sur notre préférence pour la paix. Un premier effet est l'augmentation de la transparence. Autrefois, certaines formes de violence étaient possibles parce qu'elles restaient cachées. La possibilité de les rendre visibles, en en diffusant massivement des preuves sur le web, comme cela a été fait pour les actes de torture de la prison d'Abou Ghraib, a vraisemblablement un effet inhibiteur, même si cela crée paradoxalement le sentiment d'une augmentation de la violence.

Un deuxième effet est l'accès universel à la parole publique ; cet accès donne de nouveaux moyens d'expression à des personnes qui, dans le passé, ne disposaient que de la violence physique. Il est devenu beaucoup plus efficace, pour un mouvement révolutionnaire par exemple, de développer un site web ou de diffuser les images d'une manifestation que de poser des bombes. Ainsi, les révolutions orange, des roses, des tulipes, etc. ont été beaucoup plus pacifiques que les révolutions française ou russe.

Un troisième effet, enfin, est le rapprochement des peuples. Pouvoir communiquer avec des personnes à l'autre bout du monde et accéder à leurs productions culturelles nous donne un sentiment de proximité, que n'avait sans doute pas Juan Ginés de Sepúlveda avec les Indiens d'Amérique quand il estimait, au XVI^e^ siècle, que leur intérêt même exigeait qu'ils fussent mis sous tutelle par les Espagnols.

Nous pouvons aussi nous interroger sur l'impact, moins évident, des logiciels de simulation. Si nous nous limitons aux conflits bilatéraux, il y a, dans les guerres, autant de vainqueurs que de vaincus. Pourtant, les belligérants souffrent souvent d'un biais cognitif d'optimisme qui leur laisse croire qu'ils ont de grandes chances de gagner la guerre : chacun part ainsi la fleur au fusil, persuadé de revenir victorieux. Jouer à des jeux vidéo guerriers, et perdre statistiquement une partie sur deux, contribuerait-il à réduire ce dangereux optimisme ? ■

© Shutterstock.com/Mazur Travel

# OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

## ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

**3 FORMULES AU CHOIX**

| | FORMULE PAPIER | FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE | FORMULE INTÉGRALE |
|---|---|---|---|
| **Le magazine papier** 12 numéros par an | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Le magazine en version numérique** 12 numéros par an | | | ✓ |
| **Le hors-série papier** 4 numéros par an | | ✓ | ✓ |
| **Le hors-série en version numérique** 4 numéros par an | | | ✓ |
| **Accès à pourlascience.fr** actus, dossiers, archives depuis 1996 | | | ✓ |
| **VOTRE TARIF D'ABONNEMENT** | **59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~ | **79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~ | **99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~ |
| | **29 %** de réduction * | **31 %** de réduction * | **43 %** de réduction * |

# BULLETIN D'ABONNEMENT

**À renvoyer accompagné de votre règlement à :**
Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG21STD

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

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

☐ FORMULE **PAPIER** — **59€** Au lieu de ~~82,80€~~
- 12 n° du magazine papier

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

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

FF-HSPAP-N-12N-79€ - FPAP-N-12N-59€ - FF-IN-N-12N-99€

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

### 2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Téléphone |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

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

..... @.....

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

### 3 / Je choisis mon mode de règlement

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

**Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

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

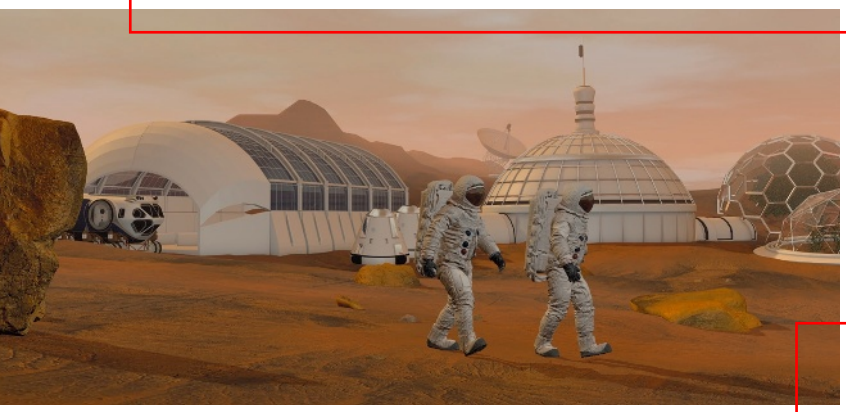
**Groupe Pour la Science** - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z



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

# VIVRE SUR TERRE… OU SUR MARS

**Pour assurer la survie de l'humanité, on voit se dessiner deux grands scénarios radicalement différents.**



Vivre sur d'autres planètes : un scénario pour sauver les humains – ou une partie d'entre eux.

L'organisation non gouvernementale Global Footprint Network évalue le « jour du dépassement », à savoir la date à partir de laquelle l'empreinte écologique de l'humanité dépasse le quota de ressources naturelles offert annuellement par le système Terre. Ainsi, selon ses calculs, en 2020, l'humanité a commencé à vivre au-dessus des moyens de la planète dès le 22 août.

Les ressources étant surexploitées, pour continuer longtemps à habiter la Terre, il n'y a pas une infinité de solutions. Les études de prospective proposent deux grands scénarios que l'actualité nous aide à illustrer.

Le premier repose sur la poursuite de la croissance économique fondée sur les technologies. Ses acteurs ne sont pas dans le déni du changement climatique ou du caractère limité des ressources ; ils sont au contraire conscients que l'humanité sur Terre va à sa perte. Ils choisissent d'aller de l'avant et de coloniser d'autres planètes (il faudrait l'équivalent de 2,5 Terres pour conserver un mode de vie à la française).

S'il s'agit encore de promesses, ce n'est plus de l'utopie. Le 18 février dernier, on a pu assister avec émotion à l'atterrissage sur Mars du robot *Perseverance* de la Nasa, dont la mission est de rechercher des traces de vie. Et sachant que Mars a probablement des ressources d'eau sous forme de glace fossile, y vivre serait possible. Le robot nous a même envoyé un selfie sur son compte Twitter avec ce message : *Perseverance will get you anywhere* (« La persévérance vous conduira n'importe où »). Certes…

> La colonisation d'autres planètes n'est plus une utopie

Mais la beauté des images et la prouesse scientifico-technique ne peuvent occulter qu'il s'agit aussi d'une préfiguration de la conquête marchande de l'espace, dont Elon Musk est le chef de file. Celui-ci prévoit de transporter, grâce à sa société SpaceX, un million de personnes sur la Planète rouge d'ici à 2050. Il rêve même d'y mourir.

Ce scénario est celui des mondes forteresses, de la sécession des élites. La survie de l'humanité, entendons des riches, passerait par d'autres planètes.

Le second scénario vise à maintenir les conditions d'habitabilité sur la Terre. Dans son récent livre *Où suis-je ?*, le sociologue des sciences Bruno Latour revisite l'hypothèse Gaïa et présente la Terre comme un « biofilm dans lequel se trouvent confinés les Terrestres », une couche de quelques kilomètres d'épaisseur que des milliards d'années de coévolution et d'interdépendance des organismes vivants ont construite.

L'objectif est alors de réparer la Terre, de la protéger d'une augmentation de température de plus de 1,5 °C, de défendre les formes de vie de cette zone critique que l'économie n'a de cesse d'artificialiser, de comptabiliser, d'individualiser. Pour ce faire, il faut comprendre nos attachements, de quoi et de qui nous dépendons.

Ce scénario, dont les acteurs sont appelés les « ravaudeurs » par Bruno Latour, et dont la version optimiste est celle de l'« écocommunautarisme », ne repose pas moins que le précédent sur de récentes connaissances scientifiques. Ainsi, nous savons maintenant que les microorganismes jouent un rôle dans les grands équilibres planétaires, dans l'état des écosystèmes, mais aussi dans l'entretien de notre corps qui abrite dix fois plus de microbes que de cellules humaines. Comprendre les interactions des humains et non-humains, imaginer le vivre-ensemble, se passer de l'économie sont des défis posés aux sciences de la durabilité.

Dans ces deux projets, l'avenir apparaît comme un territoire à explorer. Mais ils se distinguent par leur définition de l'humain et par l'organisation politique et sociale qui les sous-tend. Peut-on être un Humain sans être un Terrien ? ■

© Shutterstock.com/Merlin74

# AVEZ-VOUS




# DES RESSOURCES QUE L'ON ÉCONOMISE QUAND ON RECYCLE ?

---

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

---

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits



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

# CE QUE SIGNIFIE « OBSERVER » EN SCIENCE

**Il est très rare que les scientifiques puissent observer directement un phénomène. Ils le font à travers des instruments et des théories.**




Lorsqu'ils annoncent une découverte scientifique, les chercheurs – et les journalistes après eux – disent souvent qu'un nouveau phénomène a été « observé ». Pour le commun des mortels, le terme renvoie au sens commun et suggère qu'on a « vu » directement le phénomène en question. Or la controverse récente sur la présence de phosphine ($PH_3$) dans l'atmosphère de Vénus offre l'occasion de rappeler que très peu de phénomènes d'intérêt scientifique sont véritablement « observés ».

La controverse est née en septembre 2020 avec la publication par une équipe d'astronomes d'un article annonçant la mise en évidence de phosphine dans la haute atmosphère de Vénus, ce qui serait un fort indice de la présence d'une forme de vie. Il n'en fallait pas plus pour que Jim Bridenstine, alors administrateur de la Nasa, parle « d'événement le plus important dans la recherche de vie extraterrestre ».

Conformément à la méthode scientifique, s'est aussitôt mise en branle la norme du « scepticisme organisé », qui exige qu'une telle annonce soit scrutée en détail avant d'être considérée comme un fait scientifique avéré. D'autres spécialistes, qui doutaient du résultat annoncé, ont ainsi effectué leurs analyses. L'un des intérêts du débat suscité est de faire ressortir l'importance des nombreuses interventions techniques qui se placent entre l'objet et l'observateur et qui sont généralement passées sous silence.

> **Le signal enregistré contient la plupart du temps un « bruit » à éliminer**

On a en effet tendance à oublier que pour « observer » des objets ou des phénomènes non directement visibles à l'œil nu, il faut des instruments. Or ces instruments doivent être calibrés et le signal qu'ils enregistrent contient la plupart du temps un « bruit » à éliminer. Dans le cas qui nous occupe, la méthode utilisée pour « observer » la phosphine consiste à identifier dans la lumière provenant de Vénus et captée par les télescopes (en l'occurrence le télescope *James-Clerk-Maxwell*, à Hawaii) la composante du spectre associée à cette molécule.

Le problème est que la fréquence spécifique de la phosphine est mélangée à de nombreuses autres fréquences du spectre électromagnétique et il faut trouver le moyen de l'isoler de ce bruit de fond. En somme, il faut déjà savoir ce que l'on cherche, d'où le risque d'être victime du biais de confirmation.

La méthode employée pour isoler la fréquence signant la présence de phosphine peut donc être critiquée, ce qui peut engendrer le genre de « cercle épistémique » que le philosophe sceptique Sextus Empiricus avait déjà analysé à la fin du IIe siècle de notre ère. Pour affirmer que la phosphine est présente à une concentration de 20 parties par milliard, les auteurs de l'étude ont « corrigé » les données brutes en utilisant une formule mathématique complexe (un polynôme de degré 12). Or les critiques ont plutôt utilisé une autre formule, un polynôme de degré inférieur, diminuant ainsi le nombre de variables, mais cela a fait disparaître le signal ! Comme l'affirmait Sextus, « nous n'avons donc pas les moyens de dire [si le phénomène est réel ou non] du fait que nous ne sommes d'accord sur aucun critère au moyen duquel nous jugeons la question. » (*Esquisses pyrrhoniennes*, Livre II, 6, [53]).

La multiplication des mesures, la diversification des instruments utilisés et l'accord sur les méthodes de « correction » des données finiront probablement par confirmer si oui ou non l'atmosphère de Vénus contient du $PH_3$ ; mais il est important de ne jamais oublier que les observations scientifiques contiennent le plus souvent davantage de théorie que de données vraiment empiriques. ■

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE



TEXTILES, LUNETTES, STYLOS, LE PLASTIQUE OCCUPE UNE PLACE GRANDISSANTE DANS NOTRE QUOTIDIEN. FAISONS ENSEMBLE L'ÉTAT DES LIEUX ET DÉCOUVRONS LES ALTERNATIVES POSSIBLES ET INATTENDUES. PRÊTEZ-VOUS AU JEU !

**Avec : Jean-Baptiste Fini**, biologiste au Muséum
**Gaëlle Gabillet et Stéphane Villard**, designers, Studio GGSV
**Nathalie Gontard**, ingénieure à l'INRAE
**Aurélie Luneau**, journaliste à France Culture
**Manuel Valentin**, ethnologue au Muséum
**Manon Vichot**, association SEA Plastics - AgroParisTech

**Gratuit** - Retrouvez toutes les informations sur : **mnhn.fr/tribunes-plastiques**

POUR LA SCIENCE

france culture

TRIBUNES

# PLASTIQUES : L'OVERDOSE ?

## Samedi 3 juillet 2021 à 15h

© MNHN / The Parisianer, *The Parisianer. Chroniques du Muséum*, illustration: Fräneck



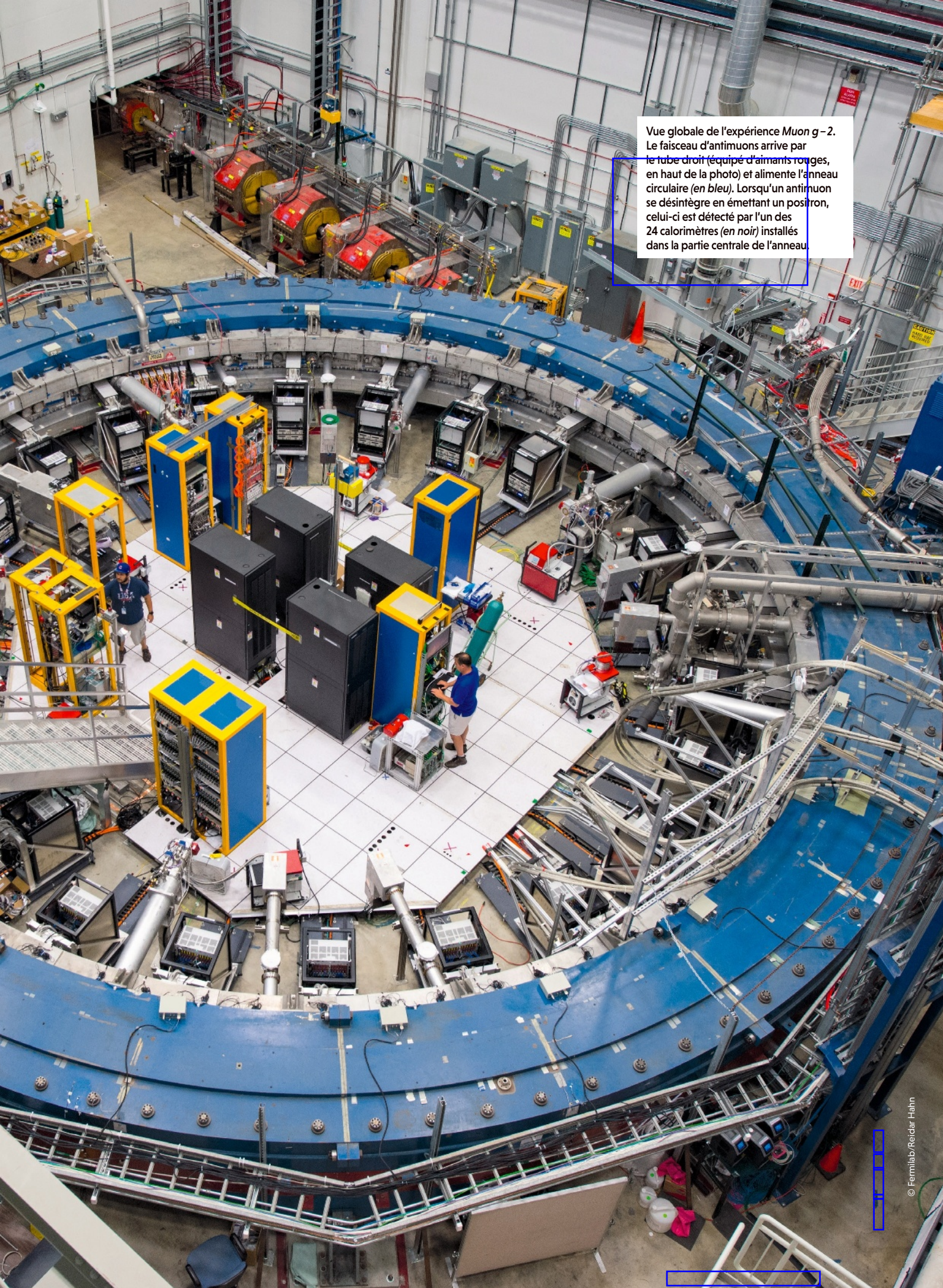
# Le muon, un accroc dans le modèle standard?

Les mesures récentes d'une propriété du muon semblent incompatibles avec la valeur théorique de référence. Un résultat qui, s'il est confirmé, ferait vaciller le modèle standard de la physique des particules. Mais un nouveau rebondissement sème le trouble dans le trouble.



Le modèle standard de la physique des particules est l'une des plus grandes réussites intellectuelles de l'humanité. Construit progressivement au cours du XX$^{e}$ siècle, cet édifice théorique décrit les propriétés des particules fondamentales et leurs interactions (à l'exception de la gravitation). Il permet de comprendre les différents types de radioactivité, d'où provient l'énergie du Soleil, comment fonctionnent les lasers ou les panneaux photovoltaïques et bien d'autres phénomènes.

Ce modèle s'est imposé il y a cinquante ans et a été confirmé par des expériences toujours plus précises. Le point d'orgue de cette validation expérimentale est sans doute la détection en 2012 du boson de Higgs au LHC, le Grand collisionneur de hadrons du Cern, situé près de Genève. Cependant, la plupart des physiciens s'accordent à penser que le modèle standard n'est qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale restant à découvrir. Mais comment trouver des indices de cette théorie



Vue globale de l'expérience *Muon g – 2*. Le faisceau d'antimuons arrive par le tube droit (équipé d'aimants rouges, en haut de la photo) et alimente l'anneau circulaire *(en bleu)*. Lorsqu'un antimuon se désintègre en émettant un positron, celui-ci est détecté par l'un des 24 calorimètres *(en noir)* installés dans la partie centrale de l'anneau.

© Fermilab/Reidar Hahn

## L'ESSENTIEL

> Le modèle standard de la physique des particules décrit les interactions fondamentales qui agissent sur les composants ultimes de la matière.

> Ce modèle est probablement une approximation d'une théorie plus fondamentale. Mais jusqu'ici, tous les tests expérimentaux s'accordaient parfaitement avec ses prédictions.

> Les physiciens tentent de le mettre en défaut avec des mesures très précises du moment magnétique du muon.

> Le résultat de l'expérience *Muon g – 2* semble s'écarter de la valeur prédite par le modèle standard. Mais un nouveau calcul théorique suggère que ce dernier tiendrait encore.

## L'AUTEUR



**SEAN BAILLY**
journaliste
à *Pour la Science*
et docteur
en physique

quand le modèle standard colle si bien aux mesures expérimentales ?

Différentes pistes sont possibles. La découverte de particules non prévues par le modèle standard serait un signe clair et net de la physique qui se cache au-delà. Une autre voie, plus indirecte, consiste à réaliser des mesures les plus précises possible dans des accélérateurs de particules et de comparer ces données expérimentales aux valeurs théoriques calculées dans le cadre du modèle standard. Une différence serait le signe qu'il manque un « ingrédient » dans ce dernier.

Parmi toutes les pistes qui relèvent de cette approche, celle impliquant une propriété du muon retient l'intérêt. Cette particule instable est une version plus massive de l'électron (*voir la figure page 27*). Le bombardement de l'atmosphère terrestre par les rayons cosmiques en produit en abondance. Les muons sont alors souvent une source de perturbation dans les expériences de physique des particules, car ils pénètrent profondément dans la matière et interagissent avec les détecteurs. Cette capacité à traverser de grands volumes rocheux est néanmoins mise à profit dans des projets qui consistent à sonder la structure des pyramides d'Amérique centrale et d'Égypte ou à suivre l'activité des volcans.

Dans les accélérateurs de particules, les physiciens peuvent aussi produire en grande quantité des muons pour en étudier les propriétés. L'une d'elles, le « moment magnétique anomal », suscite beaucoup d'espoir pour mettre à l'épreuve le modèle standard. L'expérience *Muon g – 2*, au Fermilab, près de Chicago, aux États-Unis, vient de livrer ses premières données sur cette mesure.

Or ces résultats semblent en désaccord avec le modèle standard. Le moment magnétique anomal du muon, noté $g-2$ (on verra plus loin pourquoi), a été mesuré avec une grande précision : $(g-2)/2$ vaut $116592061(41)\times10^{-11}$ ; la valeur entre parenthèses correspond à l'incertitude sur les deux derniers chiffres. L'écart avec la valeur théorique de référence est seulement de $251\times10^{-11}$, mais c'est suffisant pour parler d'une tension entre la mesure et le calcul théorique, cette différence étant grande par rapport aux incertitudes de la prédiction et de la mesure.

Cependant, tout n'est pas si simple dans le monde de la physique des particules : une équipe européenne vient de publier un résultat théorique compatible avec la mesure de Fermilab. Le muon n'a donc pas fini de défier les physiciens.

La nouvelle mesure réalisée par l'équipe de *Muon g–2* était attendue depuis près de vingt ans. Entre 1997 et 2001, l'expérience *E821*, au laboratoire de Brookhaven, dans la banlieue de New York, avait réalisé une mesure reposant sur le même principe. Des muons étaient injectés dans un champ magnétique qui faisait osciller leur moment magnétique. En analysant ce mouvement périodique, les chercheurs ont estimé le moment magnétique anomal de la particule. Ils ont annoncé leurs premiers résultats en 2001, puis les définitifs en 2004, livrant une valeur légèrement supérieure à celle prédite par la théorie. Cette nouvelle a suscité beaucoup d'enthousiasme chez les physiciens. Mais les

**La contribution hadronique au moment magnétique du muon est entachée d'importantes incertitudes**

données étaient insuffisantes sur le plan statistique pour garantir la validité du résultat. Une nouvelle expérience était nécessaire.

Or, à cette époque, l'attention était surtout tournée vers les grands collisionneurs Tevatron, au Fermilab, et LHC, au Cern. Les physiciens espéraient y découvrir le boson de Higgs et de nouvelles particules, avec notamment la perspective de mettre en évidence la «supersymétrie». Cette extension potentielle du modèle standard prévoit l'existence, pour chaque particule connue, d'un partenaire se distinguant seulement par sa masse et son spin (une grandeur quantique qui correspond au moment cinétique intrinsèque de la particule). Par exemple, un électron, dont le spin vaut 1/2 dans les unités usuelles, serait associé à un «sélectron» de spin nul.

## LES LIMITES DU MODÈLE STANDARD

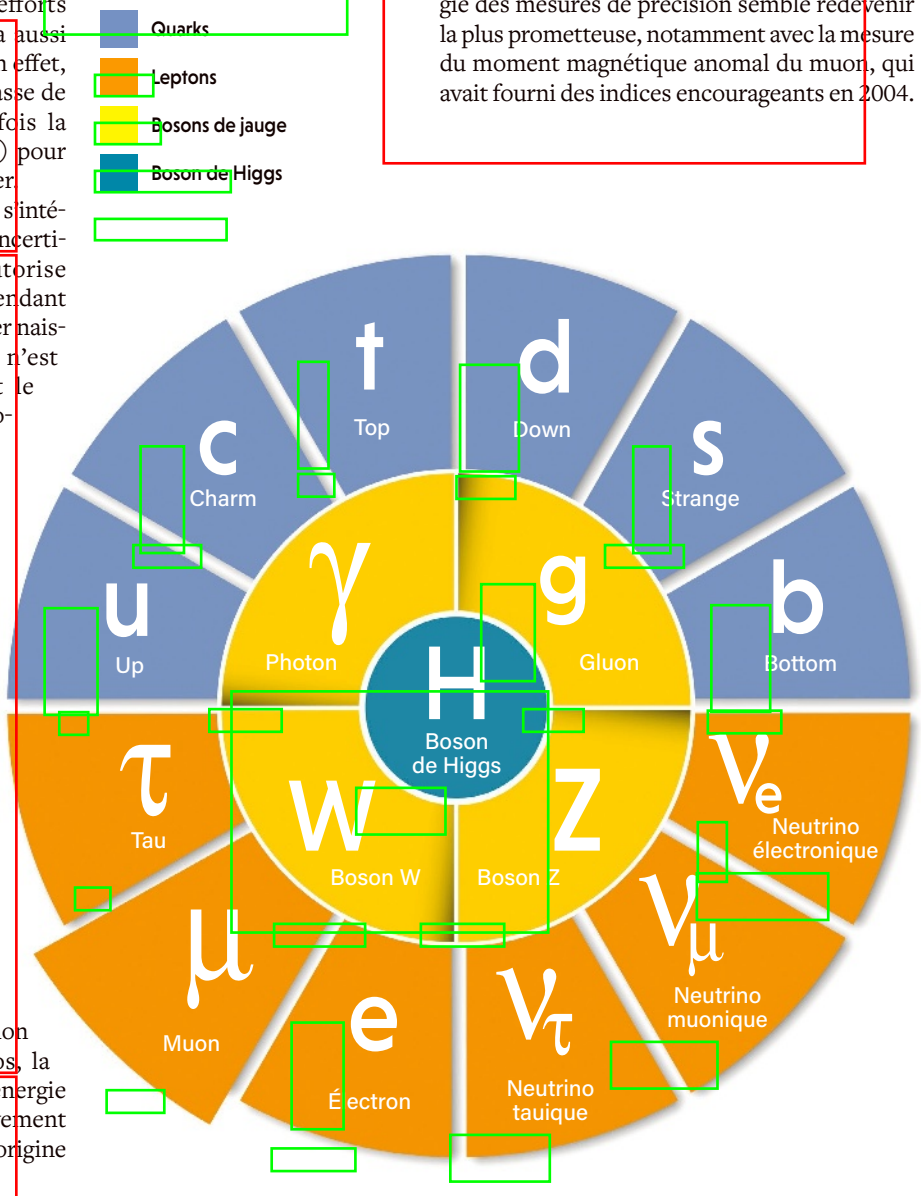
Si la découverte du boson de Higgs au LHC a couronné d'une certaine façon les efforts pour valider le modèle standard, elle a aussi confirmé certains défauts de celui-ci. En effet, pour la majorité des physiciens, une masse de 125 gigaélectronvolts (environ 125 fois la masse d'un proton, en unités d'énergie) pour le boson de Higgs est difficile à expliquer.

Pour comprendre ce problème, il faut s'intéresser aux conséquences du principe d'incertitude de Heisenberg. Ce dernier autorise l'existence de fluctuations d'énergie pendant des temps très courts qui peuvent donner naissance à des particules. Ainsi, le vide n'est jamais vraiment «vide»: l'espace est le théâtre de la formation constante et sporadique de particules (par exemple un photon, ou un quark et son antiquark), qui subsistent un très bref instant et disparaissent en s'annihilant. Une particule n'est alors jamais isolée, mais toujours accompagnée d'un nuage de particules virtuelles qui influent sur ses caractéristiques. Dans le cas du boson de Higgs, ces particules virtuelles contribuent à la valeur de sa masse de façon très significative. Or le modèle standard ne nous explique pas le mécanisme qui empêche des particules virtuelles, qui pourraient intervenir à l'échelle de Planck (environ $10^{19}$ gigaélectronvolts) par exemple, de rendre cette masse gigantesque, supérieure de quelque 17 ordres de grandeur à la masse mesurée!

Le modèle standard n'explique pas non plus la très faible masse des neutrinos, la nature de la «matière noire» et de l'«énergie sombre» (censées représenter respectivement 25% et 69% du contenu de l'Univers), l'origine de l'excès de matière par rapport à l'antimatière observé dans l'Univers, l'organisation en trois familles des particules, etc. Il semble donc raisonnable de considérer le modèle standard comme l'approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale qui offrirait un cadre plus explicatif. Les physiciens ont exploré de nombreuses pistes et misaient en grande partie sur la supersymétrie. En effet, cette théorie permet de comprendre pourquoi la masse du boson de Higgs n'est pas gigantesque, prévoit des particules dont la matière noire pourrait être constituée, etc.

On pensait que l'énergie des collisions entre protons dans le LHC serait suffisante pour produire des particules supersymétriques. Mais les expériences n'en ont décelé aucune trace. Beaucoup de physiciens commencent donc à abandonner la piste de la supersymétrie et l'espoir de découvrir de nouvelles particules dans les détecteurs du LHC. Dès lors, pour sonder la physique au-delà du modèle standard, la stratégie des mesures de précision semble redevenir la plus prometteuse, notamment avec la mesure du moment magnétique anomal du muon, qui avait fourni des indices encourageants en 2004.

**Le modèle standard comprend 17 particules élémentaires. En 1936, en étudiant les rayons cosmiques, les Américains Carl Anderson et Seth Neddermeyer ont découvert le muon, un cousin de l'électron 207 fois plus massif. Son existence était si inattendue que le Prix Nobel de physique Isidor Isaac Rabi aura cette fameuse remarque: «Qui a commandé ça?» Comme l'électron, le muon a un spin égal à 1/2, mais contrairement au premier, il est instable; sa durée de vie moyenne est de 2,2 microsecondes.**




© Pour la Science




Transporté de New York à Chicago par bateau et par camion, l'anneau de stockage des muons de l'expérience *E821*, qui mesure 14,2 mètres de diamètre et pèse 700 tonnes, a été réutilisé pour l'expérience *Muon g – 2*.

En quoi consiste exactement cette mesure? Les leptons (la famille qui inclut l'électron, le muon et le tau, une particule encore plus lourde et plus instable que le muon, ainsi que trois neutrinos) ont un spin égal à 1/2. Ils sont ainsi dotés d'un moment cinétique propre, qui correspond à une version quantique, plus abstraite, du mouvement classique de rotation propre (comme celui de la Terre autour de l'axe des pôles). Et puisque l'électron et le muon sont des particules portant une charge électrique, cette «rotation» engendre un champ magnétique. En conséquence, l'électron et le muon se comportent comme des petits aimants, caractérisés par un «moment magnétique».

## DE PETITS AIMANTS

L'expression théorique du moment magnétique de spin contient un facteur sans dimension noté $g$ et nommé facteur de Landé. En 1928, le physicien britannique Paul Dirac a proposé une équation qui porte aujourd'hui son nom et qui généralise au cas de particules relativistes (c'est-à-dire de vitesse non négligeable par rapport à celle de la lumière) et de spin 1/2 la célèbre équation de Schrödinger de la mécanique quantique. Il a alors montré qu'il pouvait calculer le facteur $g$ de l'électron, ce qu'il qualifiait de «bonus inattendu» de son équation. D'après celle-ci, ce facteur vaut exactement 2.

Or, en 1947, grâce à des mesures spectroscopiques, Polykarp Kusch et Henry Foley, de l'université Columbia, à New York, ont montré que le facteur $g$ de l'électron est légèrement supérieur à 2, de l'ordre de 0,1%. L'anomalie correspondant à la différence entre le facteur de Landé de la particule et la valeur donnée par l'équation de Dirac, soit $g-2$, est nommée, par abus de langage, «moment magnétique anomal» (le terme «anomal» est plus approprié que l'adjectif «anormal» parfois utilisé). Sa mise en évidence a été le point de départ d'un développement parallèle: les expérimentateurs cherchaient à en affiner la mesure, tandis que les théoriciens s'évertuaient à calculer l'anomalie avec la plus grande précision possible.

Pour les théoriciens, l'équation de Dirac était clairement insuffisante pour calculer le moment magnétique de l'électron, car elle ne prenait pas en compte les effets des particules virtuelles qui remplissent le vide et qui interagissent avec l'électron. En 1948, dans le cadre de la toute jeune théorie quantique des champs décrivant l'interaction électromagnétique, l'électrodynamique quantique (QED), le physicien américain Julian Schwinger a réalisé les premiers calculs des termes correctifs les plus simples. L'anomalie magnétique de l'électron ainsi obtenue était compatible avec les données expérimentales. Dans les décennies qui ont suivi, mesurer le moment anomal de l'électron a servi de test pour la QED et permis de vérifier que les chercheurs calculaient correctement des processus virtuels toujours plus complexes.

La mesure la plus récente (en 2011) du moment magnétique anomal de l'électron, réalisée avec une précision de l'ordre de $10^{-12}$, a montré que l'expérience et la théorie sont en accord avec une précision de $10^{-9}$! Cela fait de la QED l'une des théories les mieux testées en physique.

Au cours des années 1960 et 1970, la description des interactions des particules élémentaires s'est cristallisée sous la forme du modèle standard, dont la QED décrit la partie électromagnétique. Il est alors devenu plus intéressant de mesurer l'anomalie magnétique du muon, plutôt que celle de l'électron. Le muon étant près de 200 fois plus lourd que l'électron, il est beaucoup plus sensible aux effets des particules virtuelles (on montre qu'il y a $200^2 = 40000$ fois plus de chances de voir apparaître des particules virtuelles lourdes dans le voisinage du muon) et devrait donc être plus sensible à la présence de particules non incluses dans la théorie.

**Le nouveau calcul pourrait rendre caduque la tension entre l'expérience et la théorie**

© Fermilab/Cindy Arnold

Le muon est donc prometteur pour mettre à l'épreuve le modèle standard. Si l'on observait un désaccord entre la prédiction théorique et l'expérience (en prenant en compte leurs incertitudes), ce serait le signe manifeste que le modèle standard est incomplet. Concrètement, cela signifierait que des particules virtuelles ou une force très faible non prévues dans le modèle standard contribuent à la valeur expérimentale, mais n'ont pas été intégrées dans le calcul théorique des termes correctifs.

Le facteur de Landé du muon, calculé à partir de l'équation de Dirac, est égal à 2, comme pour l'électron. L'estimation des corrections quantiques est cependant plus complexe, car il faut prendre en compte non seulement la contribution des photons et des leptons virtuels (grâce à la QED, comme dans le cas de l'électron), mais aussi celle des bosons virtuels associés à la théorie de l'interaction faible (W, Z et Higgs) et celle du secteur des hadrons, terme qui désigne les particules sensibles à l'interaction forte.

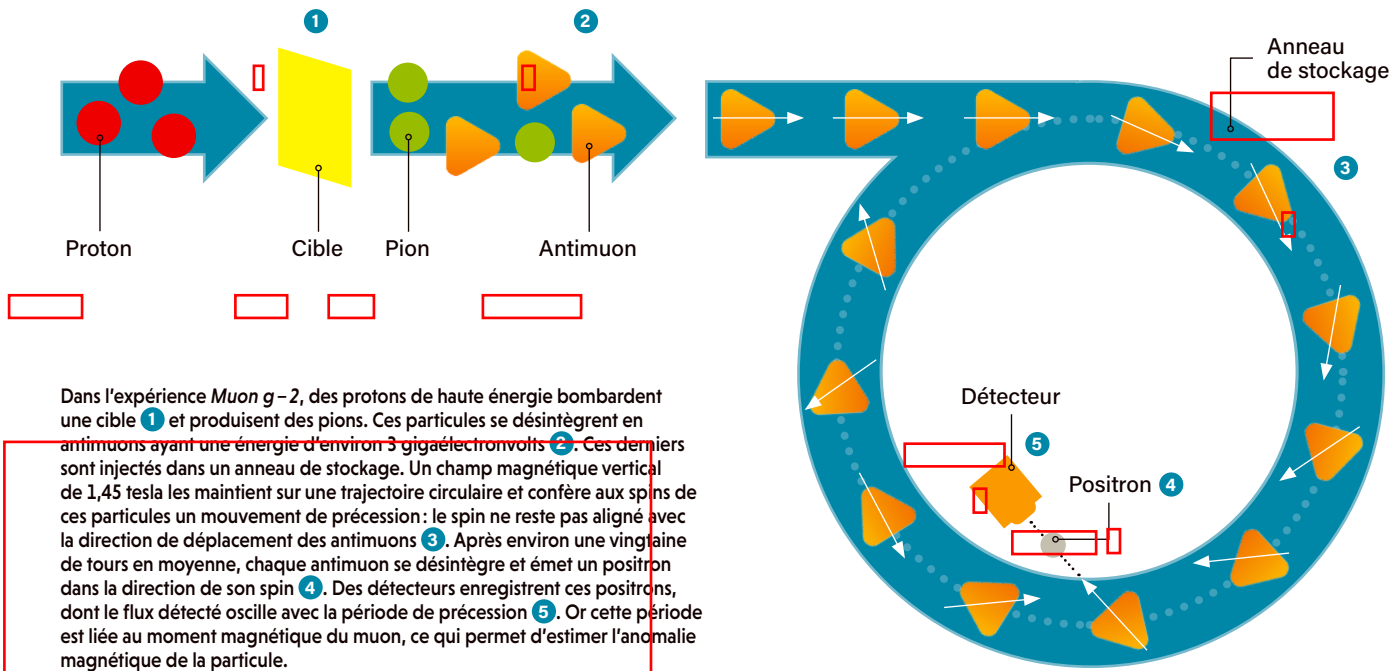
Les hadrons sont décrits par la chromodynamique quantique (QCD), la théorie de l'interaction forte qui est véhiculée par les gluons. Les quarks et les gluons sont les seules particules élémentaires sensibles à cette force, et les quarks s'assemblent en paires quark-antiquark ou en triplets de quarks (le proton et le neutron, composés chacun de trois quarks, sont deux exemples de hadrons). Les calculs de ces effets étant très difficiles, une méthode de calcul indirecte a été développée au début des années 1960 pour évaluer la contribution hadronique dominante au moment magnétique anomal du muon (*voir l'entretien pages 30 et 31*). Elle est fondée sur une exploitation théorique des données provenant des collisionneurs électron-positron et est limitée par la précision de ces dernières.

Néanmoins, ces vingt dernières années, ce volet théorique a connu d'importants progrès. En 2020, après trois ans de travail de synthèse, une collaboration internationale de plus de 130 chercheurs a évalué ces incertitudes en utilisant en particulier les données récentes et précises des expériences *Babar*, au Slac, en Californie, et *Kloe*, en Italie. Ils ont publié une valeur théorique de référence pour l'anomalie magnétique du muon : $a_{\text{théorique}} = (g-2)/2 = 116591810(43)\times10^{-11}$.

## DES EXPÉRIENCES QUI ONT DÉBUTÉ DANS LES ANNÉES 1960

De leur côté, les expériences visant à mesurer avec précision l'anomalie magnétique du muon ont débuté dans les années 1960, au Cern, notamment sous l'impulsion de Georges Charpak. Les résultats successifs n'ont montré aucun signe d'incompatibilité avec la théorie… jusqu'en 2001. C'est pourquoi les conclusions de l'expérience *E821*, à Brookhaven, ont été accueillies avec enthousiasme. L'équipe avait obtenu une mesure du moment magnétique significativement différente de la valeur théorique calculable à l'époque. Les physiciens de Brookhaven avaient-ils trouvé une faille dans le modèle standard ? Face à un enjeu aussi crucial, une confirmation indépendante par une expérience plus précise semblait nécessaire.

En 2013, le cœur de l'expérience *E821*, un aimant de 700 tonnes en forme d'anneau, a été déménagé par bateau et par camion pour être




**Dans l'expérience *Muon g – 2*, des protons de haute énergie bombardent une cible 1 et produisent des pions. Ces particules se désintègrent en antimuons ayant une énergie d'environ 3 gigaélectronvolts 2. Ces derniers sont injectés dans un anneau de stockage. Un champ magnétique vertical de 1,45 tesla les maintient sur une trajectoire circulaire et confère aux spins de ces particules un mouvement de précession : le spin ne reste pas aligné avec la direction de déplacement des antimuons 3. Après environ une vingtaine de tours en moyenne, chaque antimuon se désintègre et émet un positron dans la direction de son spin 4. Des détecteurs enregistrent ces positrons, dont le flux détecté oscille avec la période de précession 5. Or cette période est liée au moment magnétique du muon, ce qui permet d'estimer l'anomalie magnétique de la particule.**

© Pour la Science

# L'ANOMALIE MAGNÉTIQUE DU MUON, UN DÉFI THÉORIQUE

Propos recueillis par Sean Bailly



**LAURENT LELLOUCH** est directeur de recherche au CNRS et responsable de l'équipe de physique des particules au Centre de physique théorique (CNRS/Aix-Marseille Université/université de Toulon), à Marseille.

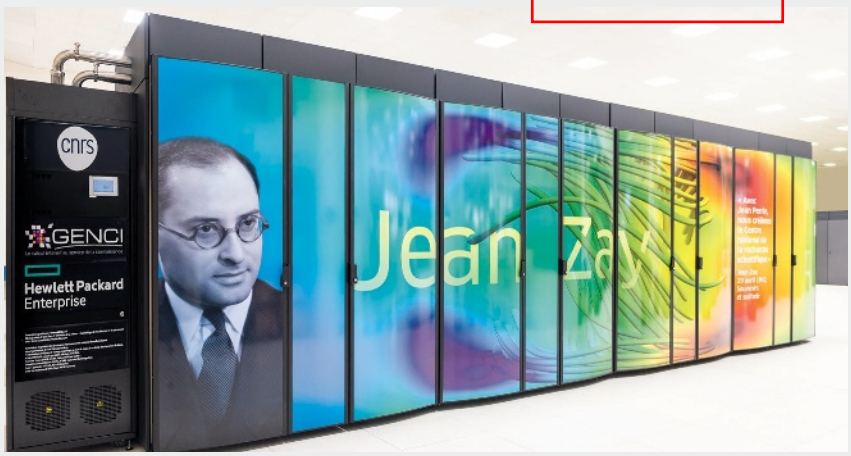
**Pourquoi les théoriciens s'intéressent-ils à l'anomalie magnétique du muon ?**

Dès le milieu des années 1950, les physiciens se sont rendu compte que l'anomalie du moment magnétique du muon était environ 40 000 fois plus sensible que ne l'est celui de l'électron aux effets de particules virtuelles lourdes qui l'entourent, du fait de sa masse plus élevée. Cela en fait une sonde très sensible pour explorer les propriétés du vide quantique. Depuis cette époque, l'expérience et la théorie ont évolué en tandem autour de ce problème, chacune poussant l'autre à progresser. Cette dynamique est devenue d'autant plus importante en 2004 quand les résultats de l'expérience de Brookhaven n'étaient plus en accord avec le calcul théorique. La mesure de *Muon g – 2*, à Fermilab, a renforcé cette tension.

**Comment interpréter cette tension ?**

Elle pourrait être le signe d'une faille dans le modèle standard. Mais avant de pouvoir conclure, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de problèmes dans l'expérience, d'une part, et dans le calcul théorique, d'autre part. Ce dernier fait appel à des techniques de théorie quantique des champs très poussées. Comme évoqué précédemment, à cause de fluctuations quantiques, le muon est entouré d'une sorte de nuage de particules dites virtuelles qui contribuent à ses propriétés, et cela se traduit par des termes correctifs.

Au niveau de précision atteint par l'expérience, il faut inclure toutes les forces et presque toutes les particules décrites par le modèle standard dans le calcul de ces corrections. Par exemple, le muon peut émettre un photon virtuel et le réabsorber. Ce processus et le calcul correspondant peuvent être représentés par un « diagramme de Feynman » simple, dit « du premier ordre » *(voir la figure page ci-contre)*. Mais on peut imaginer que le photon virtuel se transforme en une paire électron-positron qui, très vite, s'annihile et donne un photon. C'est un diagramme du deuxième ordre. La contribution des leptons et des photons est calculée grâce à une théorie développée dans les années 1940, l'électrodynamique quantique (QED).




**Le supercalculateur Jean-Zay du CNRS *(ci-dessus)* et d'autres en France et en Allemagne, ont réalisé les calculs de la valeur théorique du moment magnétique anomal du muon.**

Les physiciens savent calculer cette contribution jusqu'au cinquième ordre, ce qui représente près de 13 000 diagrammes de Feynman. On calcule aussi la contribution des bosons W et Z jusqu'au deuxième ordre. Reste le secteur hadronique, avec les quarks et les gluons.

**Ce dernier pose-t-il un problème ?**

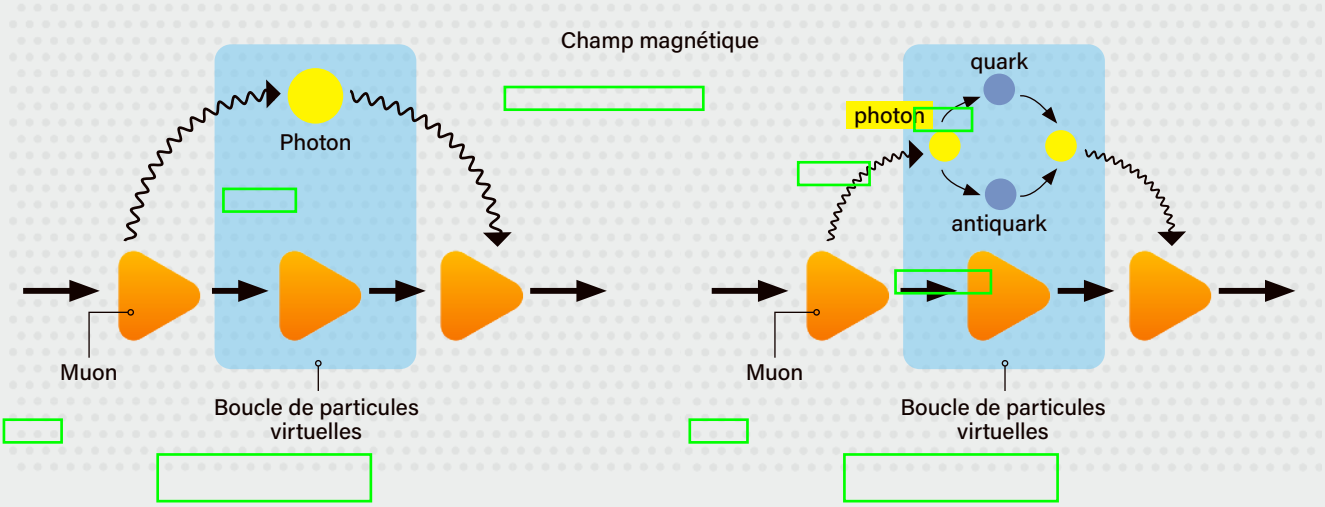
Ses corrections contribuent à une faible partie de l'anomalie magnétique du muon. Mais, parce que les équations de la théorie qui décrivent les interactions des quarks et des gluons sont hautement non linéaires, les calculs sont complexes, les incertitudes associées sont difficiles à contrôler et sont importantes. La composante dominante de cette correction correspond à une situation dans laquelle le muon émet un photon qui disparaît en créant une « bulle hadronique », laquelle se retransforme en un photon qui est absorbé par le muon. Cette bulle hadronique peut être juste une paire quark-antiquark, mais aussi des choses plus riches avec des gluons, plusieurs paires quark-antiquark, qui forment des hadrons…

**Comment calcule-t-on cette contribution hadronique ?**

Une première approche a été proposée en 1961, bien avant la naissance de la chromodynamique quantique (QCD), la théorie des champs qui décrit les interactions des quarks et des gluons. L'idée repose sur des principes très fondamentaux et des mesures expérimentales. Dans les collisionneurs électron-positron, les physiciens observent la formation de nombreux hadrons, des particules composées de quarks, principalement des mésons rho ou des pions. Or un théorème de physique ondulatoire appliqué à la physique quantique, le « théorème optique », combiné à des méthodes d'analyse complexe, permet de relier la section efficace de formation de hadrons donnés (une grandeur associée à la probabilité de produire ces particules) à la contribution virtuelle de ces hadrons à différents processus. À partir des mesures expérimentales des collisionneurs, il est alors possible d'estimer les corrections virtuelles qui entrent dans le calcul du moment magnétique anomal du muon.

Ces mesures ont été faites maintes fois et les calculs, même s'ils sont difficiles, ont été méticuleusement vérifiés, notamment par l'équipe de Michel Davier de l'université Paris-Saclay. L'approche est robuste. Pour cette raison, l'écart entre ce résultat théorique et les mesures expérimentales pourrait vraiment être un indice fort d'une faille dans le modèle standard. Cependant, pour de nombreux physiciens, l'idée de remettre en cause le modèle standard en s'appuyant sur une seule approche théorique n'était pas très rassurante. Il fallait

Portrait : © Annemarie C. Lellouch ; © Cyril Fresillon / IDRIS / CNRS Photothèque




**Dans l'expérience *Muon g – 2*, le moment magnétique anomal du muon est mesuré à partir du mouvement de précession du spin de cette particule plongée dans un champ magnétique. La valeur du moment magnétique dépend en partie des particules virtuelles que le muon émet et absorbe en permanence. Dans le cas le plus simple *(à gauche)*, le muon émet un photon puis l'absorbe. C'est la contribution principale à l'anomalie magnétique du muon. Parfois, le photon émis peut donner naissance à une paire quark-antiquark *(à droite)*. Cette composante hadronique est difficile à calculer et, de ce fait, soumise à d'importantes incertitudes.**

donc développer une autre méthode indépendante.

**En quoi consiste-t-elle ?**

Il s'agit de partir des équations de base de la QCD et de calculer directement les corrections. Dans cette théorie, des champs décrivent en tout point de l'espace-temps les quarks et leurs interactions. C'est la même idée qu'une carte météorologique qui indique la température en chaque endroit, sauf qu'ici chaque point est associé à une centaine de paramètres correspondant aux différentes particules du modèle. Dans un espace-temps continu, on a donc une infinité de valeurs et les calculs sont impossibles à mener. Une approche, la QCD sur réseau, consiste à discrétiser l'espace-temps selon un réseau hypercubique (comprenant les trois dimensions d'espace et une dimension de temps) dont la maille a une certaine longueur *a*. Les champs associés aux quarks prennent des valeurs uniquement sur les nœuds des mailles et ceux associés aux gluons seulement sur les liens entre deux nœuds voisins. On peut alors exprimer la QCD dans un formalisme de physique statistique, et les calculs deviennent possibles sur ordinateur. Par des méthodes éprouvées, on fait ensuite tendre *a* vers zéro pour retrouver le cas physique d'un espace-temps continu.

Grâce à cette approche, on passe d'une infinité de variables à un nombre fini, mais qui se compte tout de même en milliards sur les réseaux les plus grands. Il faut alors une puissance de calcul colossale pour traiter un problème donné.

**C'est l'approche que vous avez suivie ?**

Avec des collègues de l'université Loránd-Eötvös, à Budapest, en Hongrie, du Centre de physique théorique à Marseille, et de l'université de Wuppertal, en Allemagne, entre autres, nous avons exploré cette piste. En 2008, nous avons d'abord considéré un problème plus simple (le calcul de la masse du proton) pour confirmer que l'approche de la QCD sur réseau fonctionnait. Puis, en 2015, nous avons introduit la QED dans nos simulations pour calculer la petite différence de masse entre le neutron et le proton. Nous nous sommes ensuite concentrés sur le calcul du moment magnétique anomal du muon et la contribution hadronique. Pour cela, nous avons dû prendre en compte de nombreux effets, y compris de petits effets négligés jusque-là. Pour arriver au résultat, nous avons fait tourner nos calculs sur plusieurs supercalculateurs, en Allemagne et en France : Turing et le tout nouveau Jean-Zay de l'Idris du CNRS, et Joliot-Curie du TGCC au CEA.

**Quel résultat avez-vous obtenu ?**

Nous avons obtenu un moment magnétique anomal du muon très proche de la valeur expérimentale. Ce résultat arrive un peu à contre-courant de celui de référence, dont la valeur est plus faible et en tension avec les expériences. Il suggère que le modèle standard pourrait encore être compatible avec les mesures de Brookhaven et de Fermilab.

Mais l'équipe de *Muon g – 2* n'a analysé que 6 % de ses données. En accumulant plus de mesures, elle réduira ses barres d'erreur d'un facteur proche de 4. Selon l'évolution de leur résultat et des progrès théoriques que nous ferons, soit nous resterons compatibles, soit une tension va apparaître. Le suspense est entier. Par ailleurs, la situation théorique reste à éclaircir. Pourquoi les deux approches théoriques ne donnent-elles pas le même résultat ?

**Comment y voir plus clair ?**

D'autres équipes utilisent la QCD sur réseau pour calculer la correction hadronique. Nous attendons avec impatience leurs conclusions pour voir si elles confirment notre valeur ou si elles se rapprochent du calcul de référence. Dans le cas où ces autres groupes arriveraient à des résultats similaires au nôtre, il restera à comprendre pourquoi les deux méthodes ne s'accordent pas. Même si la comparaison est difficile – il est impossible par exemple de regarder terme par terme les différences –, nous réfléchissons à des stratégies et j'ai bon espoir que nous trouverons au moins une partie de la réponse.

**Et la fameuse faille dans le modèle standard ?**

Il est trop tôt pour affirmer que le modèle standard a enfin été mis en défaut. Cependant, il est clair que de nombreuses choses nous échappent, car il y a beaucoup de questions fondamentales auxquelles le modèle standard ne répond pas. La physique des particules reste un territoire riche et fascinant à explorer.

© Pour la Science

installé au Fermilab et y profiter d'un faisceau de muons plus pur et plus intense. Parti de Long Island près de New York, il a longé la côte Atlantique, le golfe du Mexique, remonté le fleuve Mississippi puis l'Illinois pour arriver à destination, après un périple de près de 5 000 kilomètres (*voir la photo page 28*). L'expérience *Muon g−2* est donc une version notablement améliorée de celle de Brookhaven. Des modifications importantes vont permettre à terme de gagner un facteur quatre sur la précision de mesure.

L'expérience *Muon g−2* a commencé à réaliser des mesures en 2018. Voyons quel est son principe. Un accélérateur de Fermilab produit un faisceau de protons de haute énergie qui bombarde une cible (*voir la figure page 29*). De nombreuses particules instables émergent de cette collision, dont des pions qui se désintègrent en produisant des muons (plus exactement des muons positifs, ou antimuons). Ces derniers sont polarisés de telle façon que leur spin soit aligné avec leur direction de déplacement. Ils sont ensuite injectés dans un « anneau de stockage », une enceinte circulaire de 14,2 mètres de diamètre.

Un ensemble d'aimants produit un puissant champ magnétique vertical de 1,45 tesla qui oblige les particules à circuler dans l'anneau suivant une trajectoire circulaire. Le champ magnétique interagit aussi avec le spin des antimuons ; en conséquence, ces spins décrivent un mouvement de précession (comparable au mouvement de précession de la Terre ou d'une toupie, dont l'orientation de l'axe de rotation change au cours du temps et décrit un cône).

Si le facteur de Landé $g$ de l'antimuon était exactement égal à 2, la période de précession du spin serait égale à celle de la circulation des particules dans l'anneau ; le spin pointerait alors toujours dans la direction du mouvement de la particule. Mais comme $g$ est légèrement supérieur à 2, le spin change progressivement d'orientation par rapport à la trajectoire et se

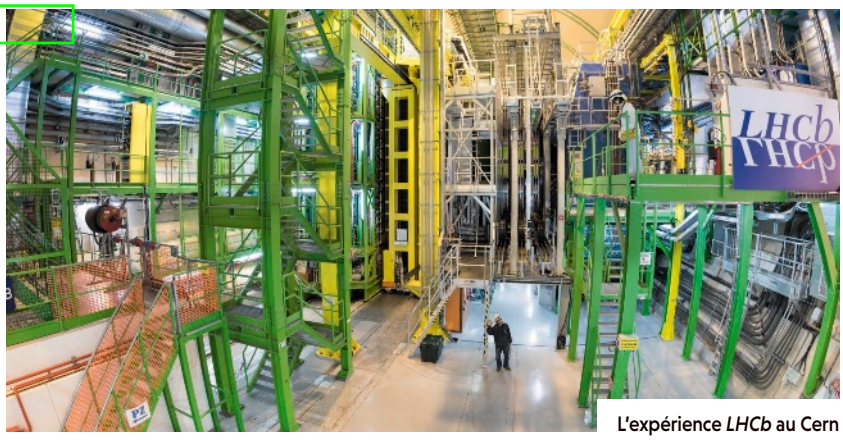
## PRUDEMMENT ENTHOUSIASTES !

Si l'étude du moment magnétique anomal du muon est une piste pour mettre en défaut le modèle standard, elle n'est pas la seule à s'appuyer sur les mesures de précision. Au LHC, et notamment dans l'expérience *LHCb*, les physiciens analysent de nombreux processus et comparent les données aux calculs théoriques. Ils regardent en particulier comment les mésons B, composés d'un quark *b* et d'un antiquark d'une autre « saveur » se désintègrent. Ces processus seraient très sensibles à la physique au-delà du modèle standard. Jusqu'à présent, quelques alertes ont mis en avant des désintégrations présentant des anomalies. Mais ces signaux ne sont pas encore assez solides statistiquement et pourraient n'être que de simples artefacts donnant l'impression d'une détection authentique.

Le 22 mars 2021, la collaboration *LHCb* a annoncé sa plus récente mesure de deux canaux particuliers de la désintégration d'un méson B en un méson K (ou kaon) avec, d'une part, une paire électron-positron et, d'autre part, une paire muon-antimuon. En principe, les chercheurs s'attendaient à obtenir un rapport des probabilités de production de ces deux processus égal à 1. En effet, le modèle standard suggère qu'il existe une sorte d'universalité entre les leptons chargés : l'électron, le muon et le tau devraient interagir de la même façon avec les autres particules (à leur différence de masse près). Mais le rapport a été mesuré à 0,846, avec une incertitude de 0,044. Le méson B se désintègre moins souvent en émettant une paire muon-antimuon qu'une paire électron-positron. En 2019, l'équipe de *LHCb* avait déjà obtenu un résultat similaire, mais la robustesse statistique était alors assez faible. La mesure de 2021, avec le double de données exploitées, a réduit l'incertitude : il n'y a qu'une chance sur mille que ce résultat provienne d'une fluctuation statistique ; on parle de « signal à 3 σ » (la lettre grecque σ, sigma, désignant l'écart-type). Au LHC, de nombreux signaux ont été identifiés à 3 σ.

En général, l'accumulation de données tend à les faire disparaître puisqu'il s'agit dans la plupart des cas d'artefacts. Ce phénomène est attendu car, avec la quantité de données livrées par les détecteurs du collisionneur, la probabilité de trouver des « faux positifs » est non nulle.

Or dans le cas de cette désintégration du méson B, les données récentes n'ont pas gommé l'anomalie. Lors de l'annonce de la collaboration *LHCb*, de nombreux chercheurs sur les réseaux sociaux se sont dits « prudemment enthousiastes ».



L'expérience *LHCb* au Cern

En général, pour parler de découverte, les physiciens des particules attendent d'atteindre 5 σ (1 chance sur 1,7 million que le signal soit une fluctuation statistique). Il faudra donc encore accumuler des données.

Une confirmation indépendante sera aussi nécessaire. Tous les regards se portent sur l'expérience *Belle II*, au Japon, qui opère depuis 2018 et qui étudie les désintégrations des mésons B produits lors de collisions d'électrons et de positrons de haute énergie.

Et si l'anomalie se confirmait ? Les théoriciens ont déjà imaginé de nombreuses explications faisant intervenir des particules inconnues du modèle standard, par exemple un boson Z′, qui serait le vecteur d'une nouvelle interaction fondamentale très faible, ou un leptoquark, une particule qui combinerait les propriétés des quarks et des leptons.

© Cern

réalige avec la direction du mouvement tous les 27 tours environ.

Les antimuons étant des particules instables, ils finissent par se désintégrer en émettant deux neutrinos et un positron (l'antiparticule de l'électron). Ce dernier est émis préférentiellement dans la direction du spin et son énergie est maximale quand le spin est dans la direction du mouvement. Le long de l'anneau, 24 détecteurs sont installés. Le nombre de positrons qu'ils détectent oscille au cours du temps suivant une fréquence dont l'analyse permet de remonter à la valeur du moment magnétique du muon.

Les physiciens ont réalisé leur analyse en «aveugle». Cette technique couramment utilisée en physique des particules consiste à construire toute la chaîne d'analyse jusqu'au bout sans avoir accès aux vraies valeurs, en l'occurrence la fréquence réelle d'oscillation du flux de positrons. L'idée est de ne pas introduire de biais dans l'exploitation des données, par exemple en ajustant même de façon inconsciente certaines variables pour que le résultat aille dans le sens le plus intéressant. À la fin, une fois la fréquence révélée, l'équipe a calculé la valeur de l'anomalie magnétique: $a_{\text{expérimental}} = 116592061(41)\times10^{-11}$. Elle confirme le résultat de *E821* et établit un écart de $251\times10^{-11}$ avec la valeur théorique $a_{\text{théorique}}$ calculée en 2020. La tension semble se confirmer.

## DÉSACCORD DE 4,2 ÉCARTS-TYPES

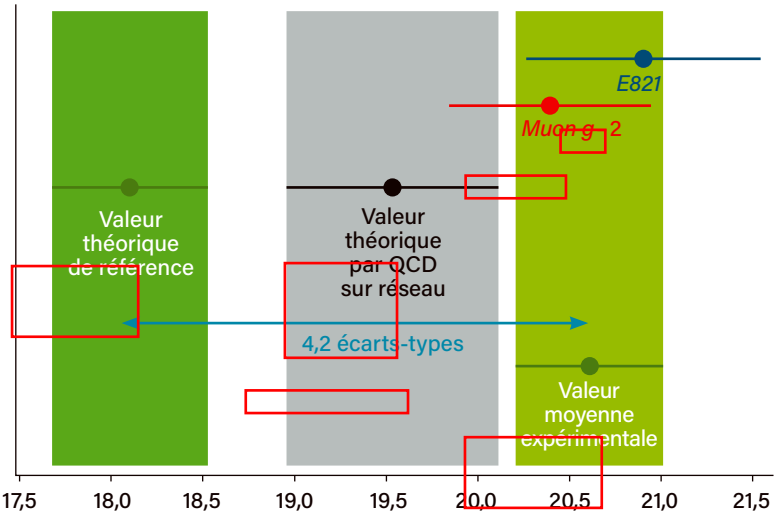
D'un point de vue statistique, la différence entre les valeurs expérimentale et théorique est significative à 4,2 écarts-types. Cela signifie que cette différence n'a que 1 chance sur 40 000 d'être une fluctuation statistique. En physique des particules, un tel résultat statistique est considéré comme solide, mais en général on fixe arbitrairement à 5 écarts-types le seuil requis pour acter une découverte; le risque d'un artefact n'est alors que de 1 sur 1,7 million.

Il faut cependant souligner que les chercheurs n'ont analysé que 6 % de leurs données. Les mesures de 2019 et 2020 sont en cours de traitement. Avec l'apport de ces dernières, les physiciens augmenteront notablement la précision de leur mesure. Par ailleurs, les expériences *E821* et *Muon g−2* reposant sur le même principe, il sera intéressant de confirmer cette tension avec le modèle standard en mesurant le moment magnétique anomal du muon d'une autre façon. Des physiciens de J-Parc, un centre de recherche au Japon, préparent actuellement une telle expérience, nommée *E34*.

La balle semble donc encore dans le camp des expérimentateurs. Pourtant, une autre équipe de théoriciens, la collaboration «Budapest-Marseille-Wuppertal» (BMW), vient d'annoncer un résultat qui sème le trouble. Pour calculer la contribution hadronique dominante, elle a mis en œuvre une approche distincte grâce à une méthode nommée «chromodynamique quantique sur réseau». Cette technique est dite *ab initio*, car elle n'utilise que les équations du modèle sans paramètres supplémentaires et sans faire intervenir des données d'autres expériences (*voir l'entretien pages 30 et 31*). En combinant leur résultat avec les autres contributions du modèle standard, les chercheurs ont ainsi obtenu la valeur $a_{\text{BMW}} = 116591954(57)\times10^{-11}$.

Cette valeur est plus proche de la mesure expérimentale que la valeur théorique de 2020 (*voir la figure ci-dessus*). Elle pourrait même rendre caduque la tension entre l'expérience et la théorie! Mais avant d'en tirer des conclusions définitives, il faudra que le résultat de ce calcul soit confirmé par d'autres équipes et il restera à comprendre pourquoi les deux approches théoriques conduisent à des valeurs différentes.

Si la divergence entre la mesure expérimentale et les prédictions théoriques persistait, ce serait probablement le signe de l'existence d'une «nouvelle physique». Il faudra alors comprendre comment avancer au-delà du modèle standard. Quelle théorie explique le moment magnétique anomal mesuré tout en étant compatible avec toutes les autres expériences de physique des particules? Il sera difficile d'y voir vraiment clair avec une seule mesure indiquant un accroc dans le modèle standard. L'espoir se trouve peut-être du côté du LHC. De récentes mesures dans l'expérience *LHCb* laissent entrevoir des signes de faiblesse du modèle standard (*voir l'encadré page 32*). Mais la robustesse de ce modèle a déjà surpris les physiciens, et risque de le faire encore! ■




**Le calcul théorique de référence donne une valeur de l'anomalie magnétique du muon plus basse que la valeur moyenne des deux expériences (*E821* et *Muon g − 2*). En calculant par une méthode différente, la QCD sur réseau, la collaboration BMW a obtenu un résultat plus proche de la valeur expérimentale.**

## BIBLIOGRAPHIE


B. Abi *et al.* (Collaboration *Muon g − 2*), **Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, article 141801, 2021.

S. Borsanyi *et al.*, **Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD**, *Nature*, en ligne le 8 avril 2021.

R. Aaji *et al.* (Collaboration *LHCb*), **Test of lepton universality in beauty-quark decays**, prépublication en ligne sur arXiv, 22 mars 2021. https ://arxiv.org/abs/2103.11769


© Pour la Science, d'après BMW et Fermilab

# ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

## OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

**3 FORMULES AU CHOIX**

| | FORMULE PAPIER | FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE | FORMULE INTÉGRALE |
|---|---|---|---|
| **Le magazine papier** 12 numéros par an | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Le magazine en version numérique** 12 numéros par an | | | ✓ |
| **Le hors-série papier** 4 numéros par an | | ✓ | ✓ |
| **Le hors-série en version numérique** 4 numéros par an | | | ✓ |
| **Accès à pourlascience.fr** actus, dossiers, archives depuis 1996 | | | ✓ |
| **VOTRE TARIF D'ABONNEMENT** | **4,90 €** PAR MOIS | **6,50 €** PAR MOIS | **8,20 €** PAR MOIS |
| | **29 %** de réduction * | **31 %** de réduction * | **43 %** de réduction * |

# BULLETIN D'ABONNEMENT

**À renvoyer accompagné de votre règlement à :**
Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG21STD

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

☐ FORMULE **PAPIER**
- 12 n° du magazine papier

4,90€ PAR MOIS -29 %

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

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

6,50€ PAR MOIS -31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

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

8,20€ PAR MOIS -43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

## 2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Courriel : ..... @ .....

*(indispensable pour la formule intégrale)*

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

## 3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

**TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT**

**Titulaire du compte**

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

**Désignation du compte à débiter**

BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

**Établissement teneur du compte**

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

**Date et signature**

**Organisme Créancier : Pour la Science**
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

## 4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

**Groupe Pour la Science** - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 58.14 Z



Vue sur la plaine alluviale du site du Tricastin et sur les contreforts occidentaux du mont Ventoux en arrière-plan.

# Mouvements sismiques : amplification sous surveillance

**CONTEXTE**

> Si le risque sismique en France métropolitaine est faible en comparaison de celui que connaissent la Californie, le Japon ou la Grèce, il existe. En moyenne, chaque décennie connaît un, voire deux tremblements de terre causant des dégâts matériels. Face à ce risque, il revient à l'IRSN de s'assurer que les niveaux sismiques retenus par les exploitants nucléaires pour le dimensionnement de leurs installations sont suffisants. Dans ce cadre, il pilote actuellement un programme de recherche pour évaluer l'incidence des effets locaux liés à la géologie de surface.

Cahier partenaire réalisé avec
IRSN
www.irsn.fr

**Tous les sols ne réagissent pas de la même façon aux secousses sismiques. Certains environnements géologiques amplifient même les vibrations. Pour mieux évaluer ce phénomène, l'IRSN développe une approche originale qui utilise comme source d'information les faibles vibrations qui secouent en permanence la surface de la Terre.**

Le 11 novembre 2019, la Terre tremble dans la vallée-du-Rhône, au sud de Montélimar. La secousse ressentie dans tout le sud-est de la France atteint une magnitude de 5,4 sur l'échelle de Richter. Elle fait quatre blessés et provoque de nombreux dégâts dans plusieurs villages de l'Ardèche et de la Drôme. En particulier dans le village du Teil, le plus proche de l'épicentre. Cet événement vient rappeler la réalité du risque sismique dans la région et l'enjeu d'une évaluation précise de cet aléa*, d'autant que la rupture sismique s'est produite non loin d'installations nucléaires : à une douzaine de kilomètres de la centrale de Cruas et à une vingtaine de celle du Tricastin.

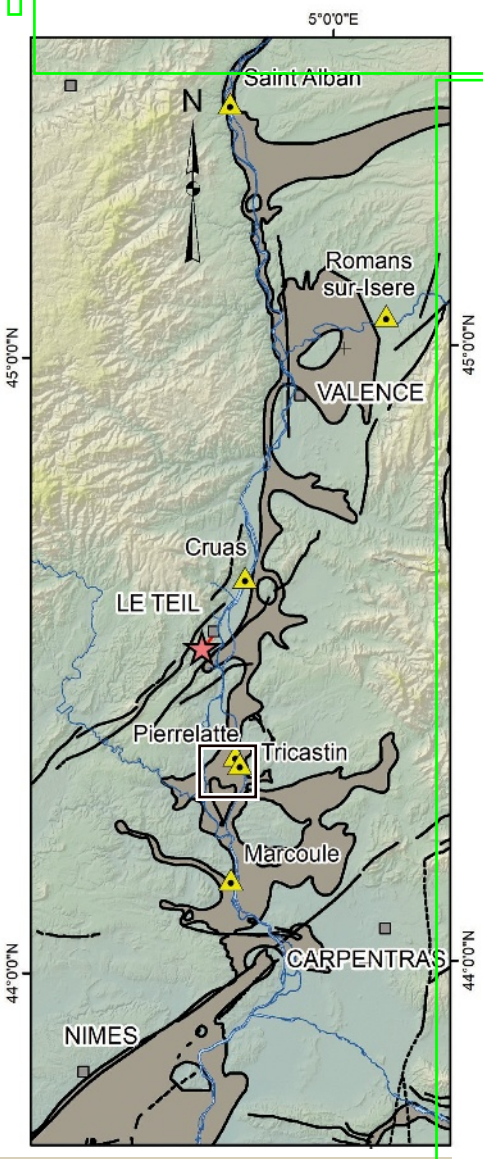
Toutes ces installations sont soumises à une réglementation qui fixe aux exploitants la méthode à suivre pour dimensionner leurs structures et équipements à l'égard de l'aléa sismique et garantir la sûreté nucléaire. L'IRSN, quant à lui, vérifie que les données et hypothèses prises en compte par les exploitants nucléaires soient cohérentes avec l'état des connaissances. À cette fin, au sein de l'institut, le bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations nucléaires (le BERSSIN) étudie non seulement la sismicité récente et la sismicité historique, répertoriée depuis 1 000 ans, de la région, mais aussi tout phénomène susceptible d'affecter les mouvements du sol.

Or les enregistrements du séisme du Teil réalisés par l'IRSN ont clairement mis en évidence un phénomène sur lequel travaille l'équipe du BERSSIN dans la vallée-du-Rhône depuis les années 2000 : un effet capable d'amplifier localement les mouvements du sol et par conséquent d'augmenter significativement le risque. De quoi s'agit-il ? « *Quand la terre tremble et que l'on mesure le mouvement du sol en un point donné, ce mouvement dépend à la fois de la source du séisme – principalement de son énergie – et de la propagation des ondes entre cette source et le point d'enregistrement. Ce qu'on appelle "l'effet de site" se joue dans les toutes dernières centaines de mètres et est lié* >

© E.M. Guéguen/médiathèque/IRSN

> *à la nature géologique et à la géométrie des couches les plus superficielles* », explique Céline Gélis sismologue au BERSSIN.

L'effet de site survient dans des configurations typiques comme des vallées remplies de sédiments. Dans ces formations meubles, les ondes sismiques se propagent bien moins vite que dans les roches encaissantes plus dures. À cause de ce fort contraste, les ondes qui arrivent dans les sédiments y sont amplifiées et piégées : elles se réfléchissent sur les bords et le fond de la vallée sans pouvoir s'en échapper. Résultat, l'amplitude et la durée du mouvement du sol augmentent, et sur de tels sites les édifices sont donc soumis à des vibrations plus fortes et plus longues. Révélé en 1985, lors du séisme de magnitude 8 qui secoua fortement la ville de Mexico, construite sur un ancien lac asséché, le phénomène a ensuite été étudié dans diverses zones actives de la planète (Mexique, États-Unis, Japon), mais il restait mal connu dans le contexte peu sismique de la vallée-du-Rhône. Comment quantifier l'effet de site dans cette région ? Quelles sont les approches les plus pertinentes pour le faire ?




**La vallée-du-Rhône** abrite plusieurs installations nucléaires ▲ : Saint-Alban-du-Rhône, Romans-sur-Isère, Cruas, Pierrelatte, Le Tricastin et Marcoule. Or le remplissage sédimentaire dans cette zone ■ amplifie les mouvements du sol provoqués par les séismes, comme celui du Teil ★. Les caractéristiques géologiques du site du Tricastin □ en font un très bon candidat pour quantifier ce phénomène d'amplification.

Pour répondre à ces questions l'équipe du BERSSIN utilise une approche empirique et une approche numérique. La première consiste à enregistrer sur le rocher et sur les sédiments les mouvements du sol provoqués par un même séisme et à comparer ces sismogrammes. Elle permet de détecter directement l'amplification et les fréquences des ondes auxquelles elle survient. La deuxième vise à simuler cet effet de site *via* des modélisations de la propagation des ondes sismiques.

En 2016, cette équipe a commencé par mettre en œuvre l'approche empirique à proximité du site nucléaire du Tricastin qui s'étend sur 600 hectares entre Valence et Avignon et qui regroupe de nombreuses installations dont des usines liées à l'enrichissement de l'uranium et les quatre réacteurs de la centrale EDF. Selon le travail très complet de reconstitution de l'histoire géologique de la zone réalisé par Marc Edward Cushing, géologue au BERSSIN, le site est implanté sur un ancien canyon. Il a été creusé par le Rhône dans des marnes et des calcaires très durs il y a environ 6 millions d'années, quand la mer Méditerranée a vu son niveau baisser de 1 500 mètres à cause de la fermeture du détroit de Gibraltar. *« Environ 500 000 ans plus tard,* explique le géologue, *le détroit s'est ouvert, l'eau est remontée dans la Méditerranée et des sédiments meubles, tels que des sables et des argiles, se sont déposés dans l'ancien canyon profond de 400 à 500 mètres par endroit »*. En surface, il peut atteindre aujourd'hui jusqu'à quelques kilomètres de large. Compte tenu du contraste fort entre les calcaires d'une part et les argiles et les sables de l'autre, tous ses attributs le désignaient comme un très bon candidat pour l'effet de site.

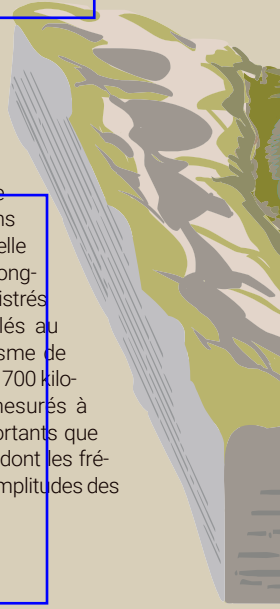
## PREMIÈRE CAMPAGNE DE MESURES

Lors d'une première campagne de mesures d'août 2016 à juin 2017, trois stations sismologiques – deux installées à l'aplomb du canyon et une sur le rocher calcaire à l'extérieur (voir carte ci-contre) – ont enregistré une dizaine de séismes intéressants, l'épicentre du plus proche étant localisé à une centaine de kilomètres. La comparaison entre les signaux d'un même séisme montre clairement une amplification du mouvement sismique à partir de 0,5 hertz de fréquence. Il peut être jusqu'à 6 fois plus fort à l'aplomb du canyon que sur les calcaires : c'est le cas notamment pour les ondes sismiques générées par le séisme de magnitude 6,5 sur l'échelle de Richter survenu le 30 octobre 2016 à Norcia, en Italie, à environ 700 kilomètres de la vallée-du-Rhône. Des mesures complémentaires ont aussi permis une première estimation des vitesses des ondes de cisaillement – les plus énergétiques et dommageables pour les bâtiments – au droit des stations : elles sont d'environ 1 000 m/s dans les sédiments tandis qu'elles atteignent 2 500 à 3 000 m/s dans les calcaires. Ce facteur de 2,5 à 3 indique bien un contraste fort.

Ces premières observations prouvent l'existence d'une amplification des ondes sismiques sur ce site, mais une mesure aussi locale ne suffit pas à évaluer la variabilité et la complexité du phénomène à l'échelle de l'ancien canyon. Bérénice Froment – également sismologue au BERSSIN –, Céline Gélis et Marc Edward Cushing ont alors conçu un projet plus ambitieux, le projet DARE. L'objectif est bien sûr de décrire au mieux l'effet de site dans la zone du Tricastin, mais aussi d'en faire un cas d'école pour tester et asseoir une nouvelle méthodologie. En effet, si grâce aux progrès instrumentaux, il est aujourd'hui possible de déployer des réseaux

## EFFET DE SITE AU TRICASTIN

Le site du Tricastin repose sur un ancien canyon où se sont déposés plusieurs centaines de mètres de sable et d'argile. Une onde sismique qui pénètre dans ces sédiments y reste piégée : les mouvements qu'elle provoque s'en trouvent amplifiés et durent plus longtemps. On le voit ici sur des sismogrammes enregistrés le 30 octobre 2016 par les instruments installés au Tricastin : ces ondes ont été émises par un séisme de magnitude 6,5 survenu à Norcia, en Italie, à environ 700 kilomètres de là. Les mouvements horizontaux mesurés à l'aplomb du canyon ■ sont beaucoup plus importants que ceux mesurés sur le rocher ■. Sur ces signaux, dont les fréquences sont comprises entre 0,4 et 10 hertz, les amplitudes des mouvements sont jusqu'à 6 fois plus grandes.



de centaines de capteurs pour multiplier les points de mesure, reste qu'en zone peu sismique on est limité par le peu d'événements à enregistrer. D'où l'idée d'utiliser une autre source d'information : le bruit sismique ambiant. On entend par là toutes les vibrations qui traversent en permanence les couches géologiques superficielles, qu'elles soient générées par des processus naturels lointains comme la houle de l'Atlantique ou de la Méditerranée, ou plus localement par des activités humaines comme le passage d'un TGV, celui des voitures sur une autoroute voisine, ou encore le bruit d'une usine.

Le premier enjeu était donc de montrer que cette « nouvelle » donnée sismique était exploitable pour mesurer l'effet de site au Tricastin. Le deuxième était de prouver qu'elle pouvait aussi servir à construire le modèle tridimensionnel de vitesse des ondes de cisaillement nécessaire pour simuler correctement la propagation et le piégeage des ondes dans le canyon. Aujourd'hui, les méthodes d'imagerie les plus performantes pour établir un tel modèle à cette échelle sont celles qualifiées « de sismique active » appliquées dans le domaine de la prospection pétrolière. Elles consistent non seulement à équiper la zone investiguée d'un grand nombre de capteurs, mais aussi à générer une source sismique bien contrôlée, en général au moyen d'un camion vibrateur. Mais le coût de ces campagnes reste très élevé.

*« L'imagerie dite "passive", parce qu'il suffit de laisser des capteurs enregistrer ce bruit de fond sismique sans avoir à générer les signaux, offre ainsi une nouvelle possibilité bien plus accessible »*, s'enthousiasme Bérénice Froment, pilote du projet DARE. La technique a déjà fait ses preuves pour produire des images de la croûte terrestre (à l'échelle de la dizaine de kilomètres) à partir des vibrations sismiques produites par la houle océanique (de fréquences inférieures au hertz). Ici l'échelle ciblée étant de quelques centaines de mètres, il faut des signaux de fréquences plus élevées (supérieures au hertz), engendrés par les processus plus locaux. Plus intermittents et très dépendants du site d'étude, ces signaux sont aussi plus difficiles à exploiter.

Pour relever tous ces défis, l'équipe du BERSSIN, aidée des sociétés EGIS et SIPROBE, a déployé 400 capteurs en février 2020 sur une zone d'environ 10 kilomètres par 10 kilomètres couvrant l'ensemble du canyon et les roches encaissantes avec pour premier objectif de mesurer le bruit sismique dans cet environnement industrialisé. En un mois d'acquisition, ils ont enregistré environ 1,2 téraoctet de données. Selon les premières analyses, les signaux liés à l'activité industrielle locale sont de bonne qualité jusqu'à plusieurs hertz, et devraient permettre d'estimer l'amplification du mouvement sismique. Ce travail est en cours.

## CANYON À GÉOMÉTRIE COMPLEXE

Parallèlement, le modèle préliminaire de vitesse des ondes de cisaillement obtenu à partir de ces données confirme les forts contrastes – d'un facteur 2,5 environ – entre le remplissage sédimentaire et les roches encaissantes. Il dévoile la géométrie tridimensionnelle complexe de l'ensemble du canyon. Il montre par exemple que le canyon est plus profond et plus encaissé au sud qu'au nord et localise précisément la zone de confluence entre l'ancien canyon de l'Ardèche et celui du Rhône au sud-ouest. Ce modèle doit être affiné avant d'être utilisé pour la simulation numérique de l'effet de site, mais il est déjà très prometteur.

La méthodologie globale étant nouvelle, les résultats demanderont à être validés par une approche plus classique. Le projet bénéficie pour cela du soutien des agences nationales de recherche française (ANR) et allemande (DFG) dans le cadre d'un partenariat avec l'université et le centre Helmholtz de Potsdam et l'université de Grenoble pour lancer une campagne complémentaire de mesures. Cette fois, ce sont 50 stations sismologiques calibrées pour enregistrer les tremblements de terre, qui, réparties sur la même zone depuis septembre 2020, collecteront des données pendant au moins six mois. Les résultats de cette collaboration franco-allemande sont attendus à l'horizon 2022. Au-delà de l'étude spécifique du site du Tricastin, ils devraient prouver l'intérêt de cette donnée abondante et rapide à acquérir qu'est le bruit sismique pour évaluer les effets de site. ■

### RÉFÉRENCES

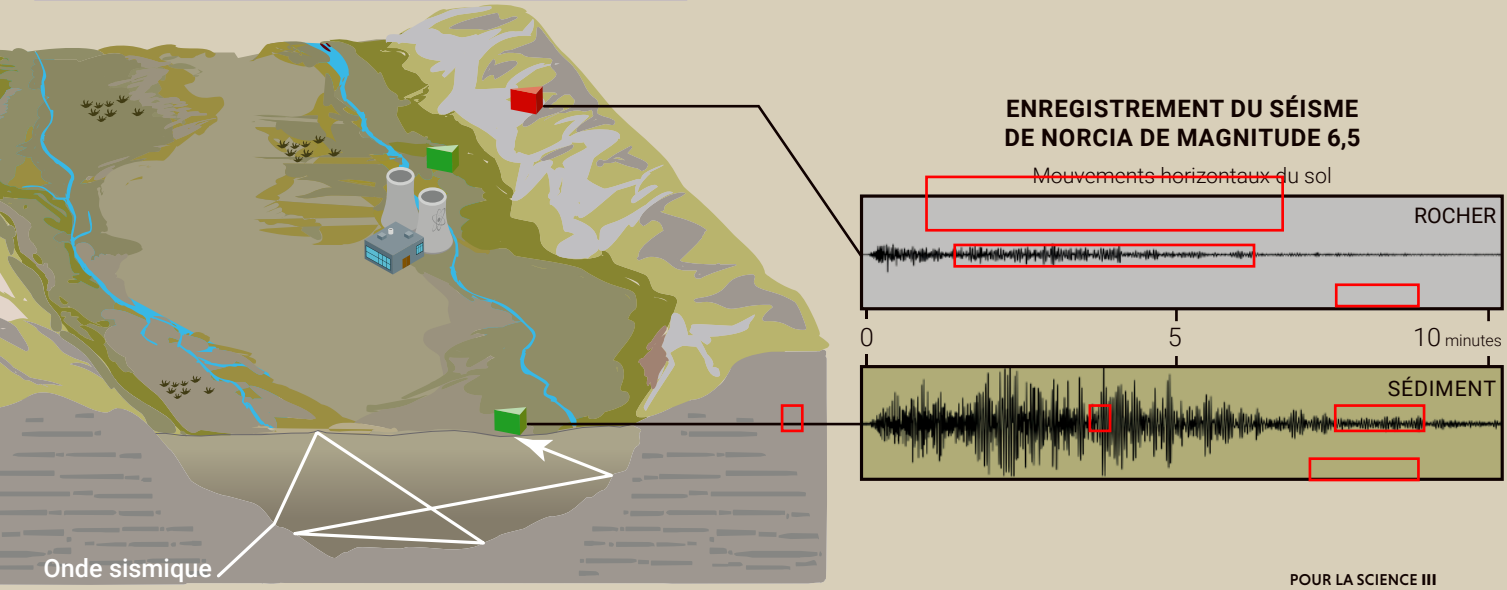

> www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2019-11-11/index.html

> Note d'information IRSN (www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_NI-Seisme-Teil-26112019.pdf)

> G. Clauzon, Bulletin, Société Géologique de France 24, 587–610, 1982 ; L Mocochain *et al.*, *Sedimentary Geology*, 188, 219–233, 2006.

> V. Perron *et al.*, *Geophys. J. Int*, 215, 1442–1454, 2018.


*L'aléa sismique est la probabilité pour une région ou un site de subir un séisme de caractéristiques données. Le risque sismique, lui, correspond à la probabilité de pertes humaines et de dégâts estimés en fonction de l'aléa.



**L'ESSENTIEL**

> *Homo naledi* est un humain qui vivait sur un vaste plateau karstique sud-africain il y a quelque 300 000 ans.

> Son petit volume crânien et sa morphologie de grimpeur semblent contradictoires avec une vie dans un milieu largement dénué d'arbres.

> Il pourrait s'agir d'une adaptation aux déplacements sur des falaises et dans des grottes, mode de vie qui lui aurait apporté eau et sécurité, et qui semble avoir été pratiqué dans le même milieu par d'autres bons grimpeurs : les australopithèques.

**L'AUTEUR**



**JEAN-LUC VOISIN**
paléoanthropologue associé au laboratoire Ades (Anthropologie bio-culturelle, droit, éthique et santé) à Aix-Marseille Université

# Homo naledi
## Le grimpeur qui n'était plus un singe

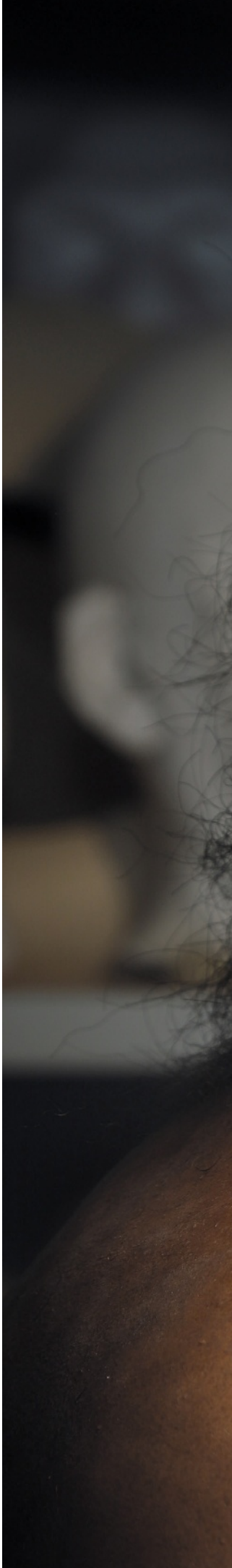
L'anatomie de grimpeur d'Homo naledi semble aberrante étant donné la rareté des arbres dans la région où vivait cette espèce. Mais il pourrait s'agir d'une adaptation aux falaises et aux grottes, habitats qui étaient aussi ceux des prédécesseurs australopithèques.

En 2015, les paléoanthropologues, incrédules, ont dû admettre dans la famille humaine une forme aberrante : *Homo naledi*. Découverte en 2013 au plus profond d'une caverne, cette sorte de gnome archaïque semble avoir retenu les capacités arboricoles des australopithèques. Pourtant, il s'agit clairement d'un humain, qui vivait il y a environ 300 000 ans dans une Afrique australe dénuée de forêts.

L'étude d'*H. naledi* ne fait que débuter et, pour l'instant, je suis l'un des seuls chercheurs français à avoir eu l'occasion d'y participer. Tout a commencé pour moi au début de l'année 2014 lorsque je reçus un courriel d'Elen Feuerriegel, alors étudiante à l'université nationale australienne, à Canberra. Elen me consultait pour ses recherches, ce qui m'amena à participer à son jury de thèse. Nous nous connaissions donc bien quand, en 2017, depuis l'université de l'État de Washington à Seattle, où elle était en poste, elle me proposa d'aider à étudier le membre supérieur d'*H. naledi*. L'analyse anatomique de l'épaule de cet *Homo* que j'eus alors le privilège de pouvoir faire et mon expérience personnelle de l'escalade m'ont amené à émettre une hypothèse surprenante : et si *Homo naledi* était une forme humaine sélectionnée par l'escalade ?

*A priori*, cette idée n'a rien de plausible : le passé arboricole des homininés, c'est-à-dire la lignée d'hominidés qui a conduit à *Homo*, remonte aux australopithèques, donc à plus de 1 million d'années – soit une époque très antérieure à celle d'*H. naledi*. Mais tout dans *H. naledi*, depuis les conditions de sa découverte jusqu'à chacune de ses caractéristiques, surprend et trouble au point de rendre cette forme humaine quasi irréelle. Et pourtant, elle existe, ou plutôt elle a existé, il n'y a pas si longtemps à l'échelle de l'évolution.

La publication en 2015 de la découverte d'*H. naledi* par Lee Berger, de l'université du



© Photo Sylvain Entressangle, Reconstitution Élisabeth Daynès/Lookatsciences



Certains des traits d'*Homo naledi* *(ici une reconstitution par la plasticienne Élisabeth Daynès)* se rapprochaient plus de ceux des australopithèques que de ceux de la lignée humaine.

Witwatersrand, en Afrique du Sud, et son équipe fit la une des journaux à travers le monde, mais surtout elle troubla profondément les préhistoriens. Le rameau humain était en effet déjà touffu. On connaissait alors entre six et neuf espèces d'australopithèques (trois espèces ne font pas consensus), trois espèces d'australopithèques robustes (paranthropes) et plus de dix espèces humaines (toutes ne faisant pas consensus non plus). C'est dans ce cadre complexe que s'inscrivait *H. naledi*, qui ajoutait au chaos ambiant.

## DES OS FOSSILISÉS D'AU MOINS 15 INDIVIDUS

*Naledi* signifie «étoile» en sésotho, l'une des onze langues officielles de l'Afrique du Sud. Lee Berger a choisi ce nom parce que ses partenaires spéléologues ont découvert les premiers ossements d'*H. naledi* en 2013 dans le complexe de grottes de Rising Star («étoile montante»), au sein du karst dolomitique de la province de Gauteng, en Afrique du Sud. La grotte se trouve à moins de 3 kilomètres de Sterkfontein et à moins de 800 mètres de Swartkrans, deux des sites à australopithèques les plus importants d'Afrique australe (*voir la figure ci-dessous*). Les vestiges osseux de cette nouvelle espèce proviennent des cavités Lesedi et Dinaledi.

À Dinaledi, plus de 1550 os, dont 137 dents isolées et 58 dents encore portées par les os mandibulaires et maxillaires, furent mis au jour – ou plutôt à la nuit absolue régnant dans la grotte. Les variations entre ces os sont moindres que celles constatées au sein de chacune des autres espèces humaines, ce qui prouve que l'on a bien affaire à une seule forme humaine. Lesedi, fouillée en 2013 sur une petite surface seulement, a livré 118 restes attribués à deux adultes et à un très jeune enfant. Les os déposés au sein des cavités Lesedi et Dinaledi l'ont été en un intervalle de temps très court et représentent un minimum de 15 individus comprenant des adultes, des adolescents et des enfants. Autrement dit, on a découvert, en une fois, tout un échantillon de population, ce qui est rarissime pour le Paléolithique.

Tout aussi spectaculaire, pour un paléoanthropologue, est le fait que tous les os du squelette, ou presque, sont représentés en plusieurs exemplaires et souvent en connexion. Par exemple, une main droite comprend tous les os du carpe (poignet), du métacarpe (paume) et des phalanges, à l'exception du pisiforme (l'un des petits os du carpe); pas moins de 110 autres os de la main l'accompagnent.

La découverte d'une population fossile du Paléolithique est déjà, en soi, un événement remarquable. Mais ses circonstances la rendent à peine croyable. Aucune industrie lithique, aucun charbon, aucun reste de faune, bref aucune trace de culture matérielle entourant les fossiles ne livre le moindre renseignement sur le mode de vie «nalédien».

L'accès extrêmement difficile à la cavité Dinaledi constitue une énigme. Il implique en effet un éclairage, donc le contrôle du feu; il oblige ensuite à franchir le «Superman's Crawl», un boyau si étroit que seuls des spéléologues petits et minces peuvent prétendre y ramper sans rester bloqués; arrivés ensuite






**Situé à environ 30 kilomètres au nord de Johannesburg, en Afrique du Sud, le Berceau de l'humanité sud-africain est une zone de 470 kilomètres carrés où de nombreux fossiles d'australopithèques et d'humains ont été découverts.**

En haut à gauche : © Shutterstock.com/Cobalt88; au milieu : shutterstock.com/Rainer Lesniewski; à droite : © T. R. Edwards et al., PeerJ, vol. 7, e6202, 2019

dans une première chambre, ils doivent effectuer une escalade d'une quinzaine de mètres sur le « dos du dragon » afin d'accéder à l'entrée d'une goulotte très étroite et presque verticale d'une douzaine de mètres (*voir la figure ci-contre*) qui porte bien son nom – The Chute – et qui donne accès à Dinaledi.

La cavité Lesedi, à 145 mètres de Dinaledi dans le même réseau souterrain, est d'accès un peu plus facile, à condition de disposer d'une source lumineuse pratique, ce qui, à la préhistoire, n'avait rien d'évident. Et tout indique qu'il y a 300 000 ans les seuls accès à ces deux cavités étaient les mêmes qu'aujourd'hui.

Dès lors, la présence d'une sorte de nécropole en ces lieux si particuliers ne s'explique pas. Nombre d'hypothèses ont été lancées : transport par des prédateurs (mais les os ne portent aucune trace de dents), inondation (mais leur répartition dans les cryptes l'exclut)… L'hypothèse défendue par Lee Berger est que les restes auraient été amenés par d'autres humains, ce qui impliquerait une pratique funéraire. D'un côté, cela semble plausible, puisque Sima de los Huesos, le « gouffre des os » d'Atapuerca, en Espagne, présente un cas similaire de nécropole souterraine, où des Prénéandertaliens auraient placé leurs morts il y a environ 430 000 ans. D'un autre côté, beaucoup de paléoanthropologues refusent d'y croire : *H. naledi* présente des traits archaïques qui leur semblent incompatibles avec une cognition développée, associée à une vie culturelle donnant un sens à la mort et à des pratiques funéraires.

## DES TRAITS ARCHAÏQUES

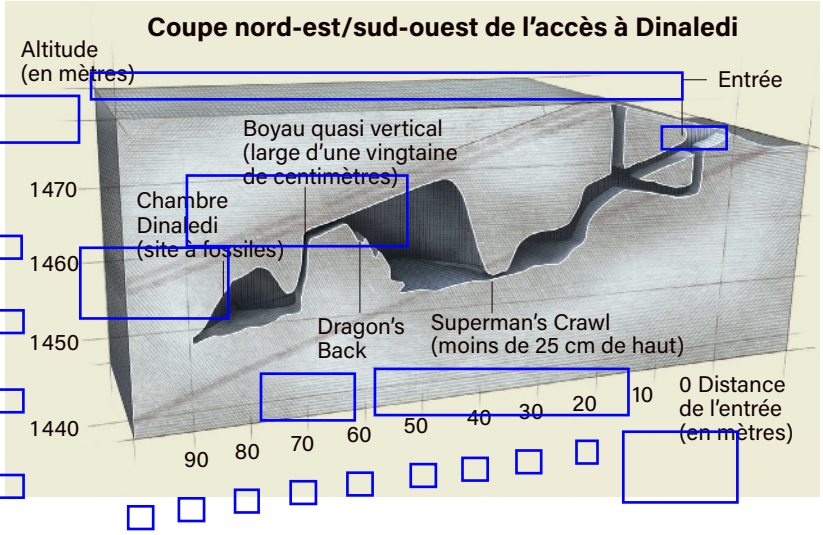
Le plus rédhibitoire à cet égard est sans doute le faible volume du crâne d'*H. naledi*, associé à un certain prognathisme (avancement de la face). Ce volume est compris entre 465 et 560 centimètres cubes, ce qui rapproche *H. naledi* davantage d'un australopithèque que des autres humains. Chez une forme humaine du Pléistocène moyen (c'est-à-dire il y a entre 781 000 et 126 000 ans), ce petit volume crânien est surprenant, car les cerveaux étaient déjà devenus imposants (plus de 1 000 centimètres cubes) chez les autres homininés de cette période. C'est tout particulièrement le cas chez les premiers Néandertaliens et hommes modernes archaïques.

Remarquons cependant que deux espèces humaines au moins de cette période ont aussi de petits cerveaux : *Homo floresiensis* et *Homo luzonensis*. Mais, dans ces deux cas, il s'agit d'espèces insulaires, dont le rapetissement est sans doute à mettre sur le compte du nanisme insulaire, une adaptation aux ressources limitées des îles.

L'aspect étrange d'*H. naledi* provient aussi de sa morphologie générale. L'essentiel du haut de son corps est plus proche de celui d'un chimpanzé que de celui d'un *Homo* ; le bas de son corps montre en revanche une adaptation poussée vers une bipédie bien plus proche de celle de l'homme actuel que de celle des australopithèques. La morphologie générale de son crâne le rapproche en outre d'*Homo erectus* (carène sagittale, constriction postorbitaire peu marquée, etc.), alors que sa morphologie mandibulaire globale est très similaire à celles de nombreux australopithèques ou des premiers représentants du genre *Homo*.

Par ses dimensions, la main d'*H. naledi* se rapproche de celle d'*Australopithecus sediba* (un australopithèque d'Afrique du Sud), en particulier de l'individu femelle MH2 de cette espèce. Elle est donc plutôt petite. Cependant, son organisation est particulière, car les os du poignet (os du carpe) et de la paume (os du métacarpe) sont très proches de ce qui existe chez les Néandertaliens et les hommes modernes. Ses phalanges, en revanche, sont peut-être plus courbes encore que celles de certains australopithèques : cela implique que la paume d'*H. naledi* devait être rigide – tout particulièrement au niveau du pouce. En favorisant la dissipation des forces, cela aide à manier des outils. *A contrario*, la morphologie des phalanges atteste un comportement locomoteur, où l'escalade tenait une place importante. La main a aussi des caractères propres dont le rôle fonctionnel est inconnu. Quoi qu'il en soit, *H. naledi* était probablement capable de tailler des outils, mais aussi de grimper et de se suspendre.

Contrairement à celle des australopithèques, la morphologie du pied d'*H. naledi* est assez similaire à la nôtre (*voir la figure page 44*), avec son hallux (gros orteil) non opposable et une voûte plantaire bien développée. Cette dernière rend le déplacement bipède moins coûteux en énergie et plus efficace. Comme pour la main, c'est la morphologie des phalanges, en




**Les cavités Dinaledi *(ci-dessus)* et Lesedi (non représentée) sont extrêmement difficiles d'accès, au point que seuls des spéléologues de petite taille y parviennent. Pourtant, semble-t-il, des membres de la population nalédienne y ont déposé leurs morts.**

Illustration de José Miguel Mayo, d'après Paul H.G.M. Dirks et al., eLife, article 09561, publié en ligne le 10 septembre 2015

particulier des phalanges proximales, qui diffèrent grandement de celle de l'homme moderne. Ces dernières, très recourbées, rentrent dans le spectre de ce que l'on observe chez les grands singes et chez certains australopithèques. Ce mélange de caractères archaïques et dérivés se retrouve aussi sur le fémur et le tibia, qui sont eux aussi morphologiquement très proches des nôtres pour certains caractères et de ceux des australopithèques pour d'autres.

Les vertèbres d'*H. naledi* contiennent un canal vertébral (où passe la moelle épinière) large en regard des dimensions générales des vertèbres. La dimension de ce canal est directement corrélée à la densité de l'innervation des muscles de la cage thoracique et du diaphragme. Cela suggère fortement que le contrôle des muscles respiratoires des Nalédiens était précis. Mais l'était-il autant que chez nous? Cette question n'a rien d'anecdotique dans la mesure où elle sous-entend des capacités langagières chez cette espèce. Le langage articulé exige en effet une coordination complexe des muscles respiratoires, qui n'est possible que si le système nerveux dédié à la respiration est suffisamment développé.

Le thorax d'*H. naledi* est en forme de cloche, à l'image de celui des homininés anciens et des grands singes actuels, alors que celui de l'homme moderne est en tonneau, c'est-à-dire d'une largeur à peu près identique sur toute la hauteur. Les restes de bassin d'*H. naledi* sont fragmentaires, ce qui limite les comparaisons, mais des observations sont malgré tout possibles. Les fragments d'os iliaques, qui constituent la partie haute du bassin, présentent essentiellement des caractères propres aux australopithèques. Ces ailes iliaques devaient donc être plutôt courtes et évasées, ce qui est cohérent avec la morphologie du thorax. En revanche, la partie basse du bassin, constituée de l'ischium et du pubis, est morphologiquement très proche de celle de l'homme moderne, ce qui est cohérent avec la morphologie du membre inférieur.

Les os d'*H. naledi* sont donc franchement énigmatiques. À tel point que pour certains d'entre eux, il est heureux qu'on les ait trouvés ensemble: si l'on avait découvert séparément certaines parties, tels que les os du haut et du bas du corps, on aurait immanquablement décrit deux espèces. Cette impression d'anomalie évolutive est renforcée par les tentatives de situer *H. naledi* au sein de l'arbre de parenté du genre *Homo*: aucune de ces études phylogénétiques ne donne le même résultat. Tous ces travaux n'ont qu'un seul résultat en commun: ils placent tous *H. naledi* au sein du genre *Homo*.

La grande proximité entre les membres supérieurs nalédiens et ceux des grands singes adaptés à l'escalade dans les arbres est particulièrement bizarre. Pour bien le comprendre, un peu d'anatomie de l'épaule s'impose. Peu étudié, ce parent pauvre de la paléoanthropologie est constitué par la ceinture scapulaire (la clavicule plus la scapula, c'est-à-dire l'omoplate) et l'humérus (le bras). La ceinture scapulaire constitue donc le premier maillon de la chaîne articulaire du membre supérieur. L'épaule rattache donc au reste du corps le membre supérieur et conditionne ainsi les capacités de ce dernier.

Les trois os de l'épaule des primates sont équipés de plus de vingt muscles. Leur nombre exact varie selon les espèces. L'omoplate flotte dans cette masse musculaire, car elle n'est en contact qu'avec la tête humérale et avec la clavicule (l'os long de l'épaule). Cette dernière est le seul os qui relie le squelette axial au membre supérieur et permet ainsi au bras de bouger dans toutes les directions, notamment en dehors du plan parasagittal, le plan perpendiculaire à celui passant par les deux épaules (*voir la figure page 44*). Cela fait de l'épaule l'articulation la plus mobile chez l'homme et ses plus proches cousins, les grands singes.

**Ses membres supérieurs sont très proches de ceux des grands singes arboricoles**

## UNE CLAVICULE ET UNE OMOPLATE DE GRIMPEUR

La clavicule et l'omoplate d'*H. naledi* ont des caractères fortement associés au grimper. La scapula montre en effet une cavité glénoïdale (la surface articulaire au contact de la tête humérale) orientée vers le haut, comme chez les grands singes non humains, alors que cette même surface est orientée latéralement chez nos contemporains (*voir la figure page 45*).

Chez les singes, l'orientation vers le haut de la cavité glénoïdale facilite l'élévation du membre supérieur ainsi que tous les mouvements de ce dernier au-dessus de la tête: elle les rend bien moins coûteux en énergie et favorise l'augmentation de la surface d'insertion de certains muscles, tels le sus épineux (très petit chez l'homme), qui peuvent ainsi être plus puissants. Chez les humains, l'orientation latérale de cette surface articulaire rend plus coûteux d'un point de vue énergétique les mouvements du bras

au-dessus de la tête, mais facilite la manipulation d'objets devant soi, dans le champ de vision, par exemple lors de l'usage d'outils.

Chez *H. naledi*, la morphologie de cette articulation est en outre identique à celle des autres hominoïdes, c'est-à-dire qu'elle est petite et légèrement ovalaire, ce qui facilite les mouvements de la tête humérale. Concernant les omoplates d'*H. naledi*, on ne peut aller plus loin, car elles sont toutes très fragmentaires. Cet os est très fragile et peu de scapulas fossiles à peu près complètes sont connues, même au Paléolithique supérieur.

Il est bon de rappeler ici à quel point la clavicule est un os particulier : d'une part, elle n'existe que chez une minorité de mammifères, et, d'autre part, elle est l'os exigeant la plus longue durée d'ossification. La clavicule est en effet la première à s'ossifier (entre la cinquième et la sixième semaine de gestation chez l'homme) et le dernier à achever son ossification chez l'adulte (entre 21 et 25 ans chez l'homme). Elle présente aussi une sinuosité complexe qui rend délicate l'étude de cet os, de ce fait longtemps laissée de côté. Heureusement, ces courbures peuvent se décomposer dans deux plans distincts (en vue dorsale et en vue du dessus), ce qui m'a permis de montrer que la clavicule est l'os qui apporte le plus d'information sur l'architecture de l'épaule et qui complète ainsi l'aspect fonctionnel issu des études de l'omoplate.

La clavicule d'*H. naledi* est plutôt courte et robuste. Elle présente aussi une double courbure aussi bien en vue dorsale qu'en vue du dessus, comme chez les grands singes actuels. L'épaule d'*H. naledi* est donc caractérisée par une omoplate haute par rapport au thorax et positionnée moins dorsalement que chez l'homme moderne, avec une cavité glénoïdale orientée vers le haut. Cette architecture de l'épaule est similaire à celle des grands singes. Pour autant, la clavicule d'*H. naledi* présente aussi des traits typiquement humains, comme l'aspect de l'insertion du ligament costoclaviculaire à l'extrémité médiale de la face inférieure de la clavicule (proche de la tête).

En résumé, l'architecture de l'épaule d'*H. naledi* est très proche de celle de l'épaule des grands singes – fondamentalement arboricoles –, mais surtout de celle de l'épaule d'*H. habilis*. Les vestiges de l'épaule de ce premier représentant du genre *Homo*, qui vivait en Afrique de l'Est il y a entre 2,5 millions et 1,6 million d'années, se limitent à quelques fragments scapulaires et claviculaires ainsi qu'à une clavicule très bien conservée. Cette dernière est courte, robuste et présente une double courbure aussi bien en vue dorsale qu'en vue supérieure. Elle a aussi une empreinte costoclaviculaire de type moderne. En d'autres termes, les clavicules d'*H. habilis* sont très similaires à celles d'*H. naledi*, qui est pourtant bien plus récent : près de 1,5 million d'années les séparent. Cette remarque est d'autant plus importante que les critères que nous avons décrits amènent de nombreux chercheurs à considérer que le comportement locomoteur d'*H. habilis* était encore en grande partie arboricole.




**Le crâne d'un individu *Homo naledi* découvert dans la cavité Lesedi, vu sous quatre angles différents. Sa morphologie est très différente de celle du crâne d'*Homo habilis*. De fait, il est peu plausible qu'*Homo naledi* soit un descendant d'*Homo habilis*.**

## DES TRAITS ARBORICOLES DANS UN HABITAT PAUVRE EN ARBRES

Ainsi, on est tenté de considérer *H. naledi* comme un *H. habilis* « évolué » qui aurait survécu dans cette région. Ce genre de phénomène évolutif, bien que rare, se produit au sein du règne animal. Le plus connu est celui du cœlacanthe, qui disparaît du registre fossile il y a environ 66 millions d'années lors de la crise biotique de la fin du Mésozoïque, puis « réapparaît » en 1938 dans l'estuaire de la rivière Chalumna en Afrique du Sud. Mais un tel scénario semble peu probable pour *H. naledi*. D'une part, aucun *H. habilis* n'a jamais été découvert en Afrique du Sud. D'autre part, les morphologies de son crâne et de ses pieds diffèrent trop de celles d'*H. habilis*. En particulier, le pied de ce dernier montre moins de différences avec le nôtre que celui d'*H. naledi*. Ainsi, une évolution d'*H. naledi* à partir d'*H. habilis* n'est pas plausible.

© J. Hawks *et al.* eLife, 2017







Il y a environ 300000 ans, une espèce humaine aux caractéristiques arboricoles prononcées vivait donc en Afrique australe. Ses traits n'ont pu qu'être sélectionnés au Pléistocène (2,6 millions d'années à 11700 ans avant le présent), une longue période qui coïncide presque avec celle de l'apparition et de l'évolution du genre *Homo*. Or elle est marquée par une succession de cycles glaciaires tous les 40000 ans, puis, à partir d'il y a 1 million d'années, avec une bien plus grande amplitude, tous les 100000 ans. Aussi bien en Afrique australe qu'en Afrique de l'Est, le registre fossile montre que, au Pléistocène, ces deux régions ont été des zones favorables à la vie des homininés. Si *H. naledi* a effectivement vu se développer des caractères favorables à l'escalade, c'est au cours du dernier million d'années en Afrique australe.

## UNE AFRIQUE AUSTRALE AUX CONDITIONS SÈCHES

Quels climats y régnaient-ils alors? La période actuelle est un interglaciaire aux conditions plutôt arides, en grande partie liées aux roches du sous-sol comme nous allons le voir. Elles ont aussi existé au cours des précédents interglaciaires, en devenant plus prononcées lors des périodes glaciaires. Nous pouvons donc considérer que, le plus souvent, la lignée nalédienne a connu en Afrique australe des conditions sèches, ne permettant qu'un couvert végétal limité en essences arborées.

Une théorie banale et répandue est que les caractères «archaïques» qui ne remplissent plus de fonction particulière seraient conservés s'ils sont neutres sur le plan évolutif, c'est-à-dire s'ils n'apportent ni avantages ni inconvénients sélectifs. Certainement valable dans certains cas, cette idée n'est pas vraisemblable dans le cas nalédien, tant ses adaptations à l'escalade sont nombreuses et prononcées. Comment imaginer que de tels caractères aient pu rester stables pendant 1 million d'années? Avec la dérive génétique, les caractères non utiles à la survie ou à la reproduction tendent à s'effacer peu à peu, et 1 million d'années est une durée largement suffisante pour cela... D'où notre très forte impression que ces traits traduisent une véritable adaptation à l'escalade.

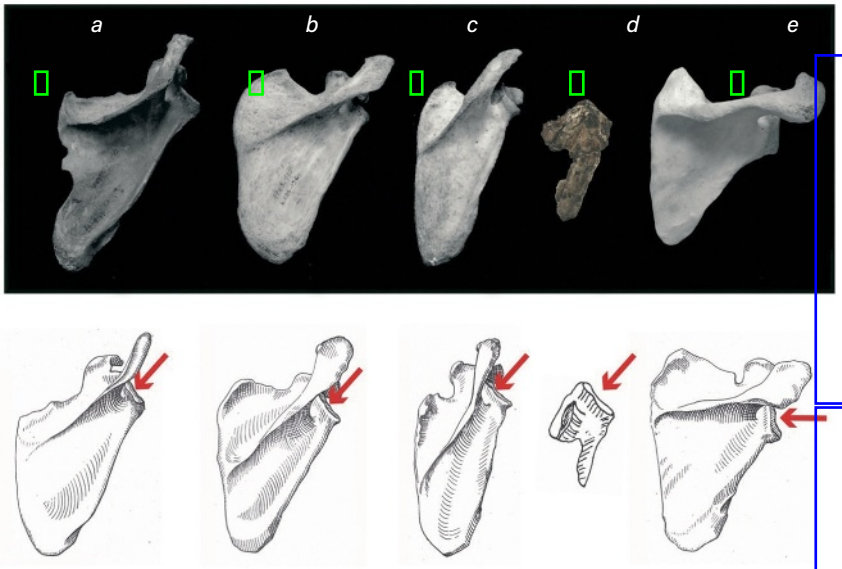
Dès lors, comment expliquer l'existence d'une petite forme humaine à traits apparemment arboricoles dans une vaste région pauvre en couvert végétal et en arbres? La géologie de la région nous offre une échappatoire. Remarquons pour commencer que, même dans une savane arborée, grimper aux arbres peut constituer une stratégie de survie pour une forme humaine. En effet, les grands prédateurs, par ailleurs toujours présents en Afrique australe, sont habituellement inactifs pendant les heures chaudes de la journée; les activités humaines, telle la chasse, sont alors moins dangereuses. Mais une mauvaise rencontre reste possible et la capacité de se réfugier très vite en hauteur est avantageuse. Bivouaquer en hauteur est en outre un choix judicieux pour de petits chasseurs faiblement armés qui doivent passer la nuit loin du refuge de leur clan. Cependant, une adaptation aussi poussée à l'escalade n'est pas indispensable s'il suffit de simplement monter de temps à autre dans un arbre. C'est pourquoi se pose la question du refuge habituel des Nalédiens.

La région surnommée Berceau de l'humanité, ou *Cradle of Humankind* en anglais, comprend l'essentiel des sites à australopithèques sud-africains ainsi que les grottes de Rising Star. Il s'agit d'un plateau calcaire plutôt aride,

### UN PIED, UNE CLAVICULE

**Trouvé dans la chambre Dinaledi, ce pied *(à gauche)* d'*H. naledi* était presque complet. Son gros orteil dirigé vers l'avant, son tarse allongé et ses articulations de la cheville calcanéocuboïde traduisent une haute spécialisation sur la bipédie totale, qui le fait ressembler de très près à un pied d'humain moderne. Le pied d'*H. naledi* diffère cependant de celui de l'homme moderne par ses phalanges proximales plus courbées et par des caractéristiques suggérant une arche longitudinale médiane réduite. Ces résultats suggèrent des modes de locomotion divers : la marche et l'escalade ? Ci-dessus à droite, une clavicule droite et complète d'*Homo naledi* provenant de la cavité Lesedi et montrée sous différents angles. Elle est similaire à celle d'*Homo habilis*.**

À gauche : Équipe de Lee Berger ; À droite : © J. Hawks *et al.* eLife, 2017




**Les omoplates de grands singes et d'humains mis en position anatomique. La cavité glénoïdale *(flèche rouge)* est orientée plutôt vers le haut chez les grands singes *(a : orang-outan, b : gorille, c : chimpanzé)* et chez *H. naledi (d)*. Chez *Homo sapiens*, la cavité glénoïdale est orientée à l'horizontale *(e)*.**

mais recevant des précipitations relativement importantes pendant le chaud été austral. Cela favorise la formation de nombreux karsts, c'est-à-dire de terrains comportant de nombreuses grottes formées par la dissolution de roches telles que le calcaire, la dolomite et le gypse. Ces paysages comprennent des centaines de cavités, dont certaines prennent la forme de dolines, c'est-à-dire de puits en terrain plat. Ces dolines constituent des refuges pour de bons grimpeurs à la fois contre les prédateurs et contre la chaleur. Elles donnent aussi accès à de l'eau, qui manque toujours en surface sur les plateaux karstiques. L'eau circulant dans les réseaux souterrains est en outre fraîche et propre, ce qui limite les risques de développer des pathologies graves et leur cortège de diarrhées et, donc, de déshydratations sévères.

## DES FALAISES ET DE PROFONDS RAVINS À PROXIMITÉ

Par ailleurs, à une vingtaine de kilomètres au nord de ce site se trouve le Magaliesberg, une chaîne de montagnes de 196 kilomètres de long et culminant à 1853 mètres. Ce massif est posé sur le même plateau que celui comprenant le Berceau de l'humanité, qu'il ne domine que de quelques centaines de mètres. Partout, il est entrecoupé de falaises, souvent hautes de plusieurs dizaines de mètres, et de *kloofs*, des ravins creusés par l'écoulement et pouvant atteindre une centaine de mètres de profondeur, où la concentration de l'humidité autorise une végétation plus luxuriante. Ces falaises reçoivent peu de lumière solaire directe et restent donc plutôt fraîches, même en été.

La région qui entoure le Magaliesberg a manifestement joué un rôle important pour les hominiinés, puisque l'on trouve à proximité l'essentiel des sites à australopithèques d'Afrique du Sud. Or, étant donné l'aridité relative de cette région d'Afrique australe et, d'ailleurs, de l'Afrique de l'Est, ce qui nous étonne dans la présence d'une espèce humaine apparemment arboricole dans un milieu peu arboré devrait nous étonner autant s'agissant des australopithèques, dont les capacités arboricoles étaient grandes elles aussi. D'ailleurs, nombre de fossiles australopithèques retrouvés dans des cavités semblent dus à des chutes.

Il est donc raisonnable de supposer que l'adaptation à l'escalade d'*Homo naledi* correspondait à l'écosystème où il vivait, à savoir une région regorgeant de grottes et de falaises, non dénuée d'arbres en certains lieux tels que les *kloofs*. Ce milieu de vie était intéressant pour les animaux par son humidité dans une région souvent aride (particulièrement pendant les épisodes glaciaires), et il l'a été pour des australopithèques fortement arboricoles, qui avaient aussi sans doute de bonnes aptitudes pour escalader les rochers ou descendre dans les grottes où certains furent retrouvés ; pour les mêmes raisons, il l'était aussi pour les grands prédateurs, qui devaient y chasser, mais sans pouvoir pénétrer dans les grottes en forme de puits aux entrées verticales.

Ainsi, par adaptation à ce milieu de vie riche mais dangereux, *H. naledi* aurait acquis une bonne aptitude à l'escalade. Se mettre en hauteur est une stratégie intéressante, car trois à quatre mètres suffisent pour se protéger des prédateurs, d'autant que l'on pouvait y retrouver de la fraîcheur. Les Nalédiens auraient été des arboricoles occasionnels, mais surtout des grimpeurs de bloc. Cette espèce se serait spécialisée dans un mode de vie dont la sécurité tenait à la capacité à prendre très vite de la hauteur. À la même époque, *Homo sapiens* vivait aussi en Afrique australe ; de plus grande stature, ces humains auraient misé davantage sur la mobilité, afin d'exploiter un territoire bien plus vaste, et sur un effet de groupe amplifié par leur armement efficace face aux prédateurs.

Pendant trop longtemps, on voyait l'évolution comme une succession linéaire de formes : dans le cas des humains, on imaginait la séquence *Homo habilis*, *H. erectus*, *H. neanderthalensis*, *H. sapiens*... Cette vision est remplacée aujourd'hui par celle d'une évolution buissonnante, caractérisée non seulement par une certaine tendance à l'homogénéisation des formes grâce aux échanges culturels et génétiques, mais aussi, *a contrario*, par la persistance de formes isolées dans un environnement particulier exigeant un mode de vie spécialisé. Ces formes isolées et spécialisées incluent *H. floresiensis* et *H. luzonensis*, mais également *H. naledi*. ■

## BIBLIOGRAPHIE

E. Feuerriegel *et al.*, **Upper limb fossils of Homo naledi from the Lesedi Chamber, Rising Star System, South Africa,** *PaleoAnthropology*, vol. 2019, pp. 311-349, 2019.

J. Hawks *et al.*, **New fossil remains of *Homo naledi* from the Lesedi Chamber,** South Africa, *eLife*, vol. 6, article e24232, 2017.

K. Wong, **L'incroyable *Homo naledi*,** *Pour la Science*, n° 464, pp. 60-69, juin 2016.

L. Berger *et al.*, **Homo naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa**, *eLife*, vol. 4, article e09560, 2015.

P. Dirks *et al.*, **Geological and taphonomic context for the new hominin species *Homo naledi* from the Dinaledi Chamber, South Africa**, *eLife*, vol. 4, article e09561, 2015.

© J. Hawks *et al.*, eLife, 2017



## L'ESSENTIEL

> L'utilisation des plastiques est aujourd'hui massive et engendre une quantité énorme de déchets persistants et nocifs.

> De nombreux travaux visent à développer des matériaux véritablement recyclables et biodégradables pouvant remplacer les plastiques classiques, en particulier pour les emballages.

> Ces matériaux innovants ne pourront résoudre qu'une petite partie du problème des plastiques.

> Les efforts doivent surtout porter en amont sur la réduction de la consommation de plastiques non indispensables.

## L'AUTRICE



**NATHALIE GONTARD**
directrice de recherche à l'Inrae, à Montpellier, au sein de l'unité Iate (Ingénierie des agropolymères et technologies émergentes)

# Que faire des emballages plastiques ?

Les plastiques, dont les emballages représentent une forte proportion, finissent pour la plupart en déchets persistants. Une pollution massive qui prend de plus en plus d'ampleur et que l'on tente de juguler en mettant au point des procédés de recyclage et des matériaux biodégradables.

Facile à mettre en forme, bon marché, léger, résistant, aisément disponible, le plastique s'est imposé depuis la seconde moitié du XX$^{e}$ siècle dans notre quotidien et dans tous les secteurs d'activité : aéronautique, bâtiment, vêtements, sport, automobile, électronique, etc. Pour produire, transporter, conserver et commercialiser nos aliments, l'agriculture et l'industrie agroalimentaire occupent dans ce tableau une place très importante : elles représentent aujourd'hui environ 40 % de la consommation de plastique.



© Shutterstock.com/aldarinho



Une plage aux Philippines. Les deux tiers des 9 milliards de tonnes de plastiques produits depuis que ces matériaux existent se retrouvent aujourd'hui sous la forme de déchets présents partout sur la planète.

On produit dans le monde près de 400 millions de tonnes de plastiques vierges chaque année. Nous consommons au moins l'équivalent de notre poids corporel par personne et par an de plastique. Et ce n'est qu'une moyenne mondiale. Le chiffre est parfaitement corrélé au PIB d'un pays, ce qui signifie que, par exemple, les Français figurent parmi les plus gros consommateurs de ces matériaux.

Et la production continue d'augmenter. Les chiffres issus des sources les plus fiables, telles que la Banque mondiale, l'Agence européenne pour l'environnement ou encore l'équipe de Jenna Jambeck, à l'université de Géorgie, aux États-Unis, montrent que la production de plastique a été multipliée par vingt au cours des cinquante dernières années, et qu'elle devrait encore doubler dans les vingt prochaines années.

Depuis les années 1950, l'industrie mondiale a ainsi produit plus de 9 milliards de tonnes de plastiques, dont seulement 0,5 milliard ont été incinérées. Qu'est devenu le reste ? Plus généralement, que deviennent les plastiques après usage ?

## ENVIRON 60 % DES EMBALLAGES S'ACCUMULENT DANS L'ENVIRONNEMENT

En Europe, et selon les données de Plastics Europe, l'association européenne des producteurs de matières plastiques, sur les quelque 20 millions de tonnes de plastiques utilisés annuellement pour l'emballage (alimentaire et non alimentaire), 34 % sont incinérés et contribuent à la production d'énergie, mais aussi à l'émission de gaz à effet de serre et à la pollution de l'air, 16 % sont enfouis sans aucune mesure permettant d'éviter leur dégradation puis leur dispersion dans les sols, 10 % ne sont pas répertoriés et probablement perdus dans la nature, 32 % sont recyclés vers des objets qui ne seront pas eux-mêmes recyclés ensuite ou qui seront envoyés vers des pays moins regardants, et seront donc jetés à plus ou moins longue échéance et distance de leur lieu de consommation (*voir la figure page 49*).

Au mieux, seuls 5 % des emballages plastiques sont réellement recyclés en « boucle fermée », c'est-à-dire pour produire un objet similaire en tout point à celui d'origine. Le reste, hormis ce qui est incinéré, constitue un vertigineux réservoir de microplastiques et nanoplastiques en devenir.

En effet, le principal problème du plastique, outre celui des additifs potentiellement nocifs qu'il contient et qui sont susceptibles de migrer par exemple dans nos aliments (*voir l'article de Jean-Baptiste Fini dans ce numéro*), est qu'il ne s'intègre pas dans l'un des grands cycles biogéochimiques de la nature. Il ne se solubilise pas comme le font les métaux, la pierre ou le verre, pour reminéraliser les eaux et les sols. Il n'est pas non plus digéré par les microorganismes du sol, contrairement aux matériaux d'origine naturelle (papier, carton, coton, cuir…). Le plastique ne fait que se fragmenter peu à peu, en quelques dizaines ou centaines d'années, en microparticules puis nanoparticules.

## DES MICROPARTICULES QUI SERONT DE PLUS EN PLUS ABONDANTES

Ces microdéchets voyagent facilement, se chargent en polluants, s'invitent dans les océans, l'eau de surface, les sols, l'air respiré, les aliments. Cette lente fragmentation est aujourd'hui déjà bien palpable, alors que seule une toute petite partie des déchets plastiques accumulés a eu le temps de se dégrader. On retrouve ainsi des micro- et nanoplastiques jusque dans les zones les plus reculées de la planète, des fosses océaniques aux glaciers de l'Arctique. On les retrouve aussi tout près de nous, dans les eaux courantes ou les aliments, et jusque dans nos organes.

Par exemple, en 2021, Alessandro Svelato, de l'hôpital San Giovanni Calibita Fatebenefratelli, à Rome, et ses collègues ont décelé une contamination aux microplastiques dans quatre des six placentas humains qu'ils ont étudiés. Kieran Cox et ses collègues, à l'université de Victoria, au Canada, ont estimé en 2019 que nous absorbons près de 50 000 microparticules de plastique par an *via* notre alimentation ; selon la méta-étude de Thava Palanisami, de l'université de Newcastle, en Australie, et ses collègues, on en absorbe en moyenne jusqu'à 5 grammes par semaine, l'équivalent d'une carte bancaire !

**Chacun absorberait en moyenne jusqu'à 5 grammes de plastique par semaine**

Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que, en s'accumulant dans un organisme, les microplastiques engendrent des phénomènes inflammatoires, de stress oxydatif et des déséquilibres métaboliques. L'impact

### QUELQUES CHIFFRES

**Production mondiale de plastiques** : 368 millions de tonnes en 2019, dont environ 40 % pour les emballages (359 millions de tonnes en 2018, 2 millions de tonnes en 1950)

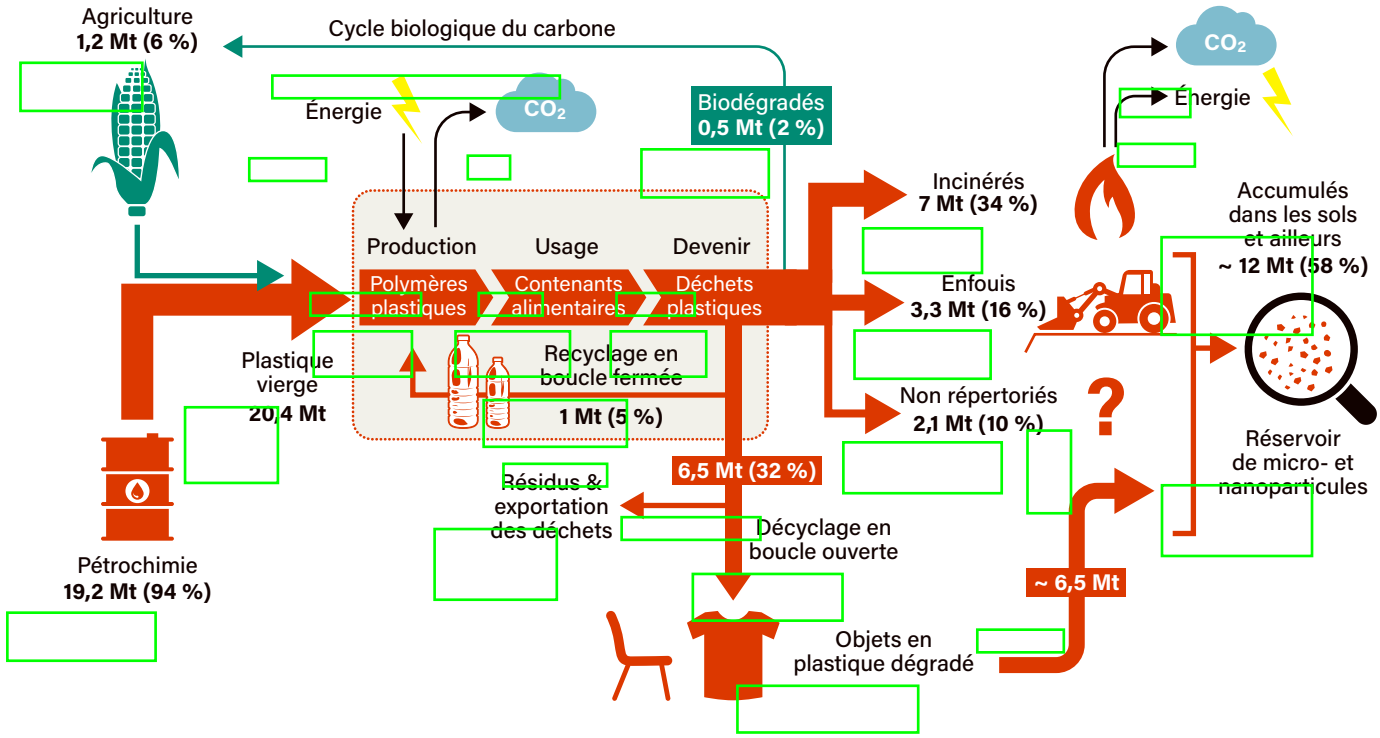
**Production cumulée depuis le début du XXe siècle :** 9 milliards de tonnes

**Plastiques encore en usage aujourd'hui :** 2,5 milliards de tonnes

**Cumul des plastiques incinérés (1950-2015) :** 0,5 milliard de tonnes

**Cumul des déchets plastiques (1950-2015) :** 6 milliards de tonnes

Sources : Plastics Europe et R. Geyer *et al.*, *Science Advances*, vol. 3, e1700782, 2017




**Ce schéma résume d'où proviennent les plastiques des emballages en Europe et ce qu'ils deviennent après usage. Tous les pourcentages sont calculés par rapport à la consommation européenne totale d'emballages plastiques, qui était en 2019 de 20,4 mégatonnes (chiffres de Plastics Europe). Tout le plastique qui n'a pas été incinéré ou recyclé en boucle fermée, soit environ 58 % des 20,4 mégatonnes, constitue un réservoir de futures micro- et nanoparticules.**

sur la santé est encore mal connu, mais on peut craindre que les microplastiques, qui seront beaucoup plus abondants dans quelques décennies, constituent une bombe à retardement.

La pollution par les déchets en plastique est ainsi un problème grave, auquel le monde de la recherche s'efforce aujourd'hui de trouver des solutions. Notamment, les scientifiques tentent de répondre aux appels à projets liés à la stratégie politique de l'Union européenne, qui vise 100 % de plastiques recyclables à l'horizon 2030.

En théorie, le recyclage s'inscrit dans une économie dite « circulaire », qui consiste à régénérer à l'infini et à l'identique un matériau après usage afin de prévenir l'accumulation de ses déchets et l'épuisement des ressources. C'est le cas du verre et des métaux, recyclés à plus de 70 % et 50 % respectivement en France, ainsi que des matières d'origine naturelle, comme les papiers et les cartons qui, en plus d'être « recyclés » à un taux de 66 % selon le site Conso Globe, sont capables d'être regénérés à l'infini *via* le cycle naturel du carbone par biodégradation.

## DU « DÉCYCLAGE » ET NON UN RÉEL RECYCLAGE

Or le recyclage actuel du plastique ne répond pas à cette définition. Le meilleur des recyclages du plastique est le recyclage dit « mécanique » du polytéréphtalate d'éthylène (PET) des bouteilles d'eau, qui consiste essentiellement à le décontaminer des substances indésirables qu'il a absorbées lors de son utilisation. Il ne s'applique qu'un petit nombre de fois, car le matériau se dégrade, et seulement à une faible proportion des quantités utilisées et qu'il ne peut réduire au mieux que de moitié. En France, la capacité de recyclage mécanique des bouteilles en PET représente 50 000 tonnes par an, soit 1 % des 5 millions de tonnes de déchets plastiques produits chaque année dans le pays.

Tous les autres prétendus « recyclages » du plastique consistent en de nouveaux usages d'un plastique dégradé que l'on stocke ainsi dans des objets tels que vêtements, cintres, pots de fleurs, bancs publics, revêtements routiers, etc., en remplacement de matériaux traditionnels capables, eux, de réintégrer l'un des grands cycles biogéochimiques naturels. Les recyclages de ce type sont à proprement parler des « décyclages », qui ne font pas disparaître le plastique en tant que déchet. Surtout, ils encouragent sa consommation, car, en le faisant disparaître de notre vue, ils nous déculpabilisent. Il ne s'agit donc pas du tout d'économie circulaire, mais d'une économie de type « tire-bouchon » où l'on continue d'extraire des ressources et d'accumuler des déchets plastiques persistants.

Ainsi, au cours des dix dernières années, l'Europe a globalement doublé son taux de recyclage des plastiques (de 5 à 10 millions de tonnes), mais sans avoir diminué sa consommation de plastique vierge, qui a bien au contraire augmenté de 20 % et qui continue d'augmenter (chiffres de Plastics Europe).

© Bruno Bourgeois

La recherche s'active donc pour inventer des procédés de «vrai recyclage» du plastique. Plusieurs entreprises développent ainsi de nouvelles technologies fondées sur la solubilisation puis le nettoyage des chaînes de polymères à l'aide de solvants (cas de Pure Cycle Technologies, aux États-Unis). D'autres déconstruisent les chaînes de polymères par voie chimique (Ioniqa aux Pays-Bas, Jeplan au Japon, Loop Industries au Canada) ou enzymatique (Garbo en Italie, Carbios en France) afin de séparer les impuretés et récupérer les monomères avant de les repolymériser. D'autres, enfin, poussent la déconstruction du déchet plastique un peu plus loin, toujours par voie chimique, thermique ou biologique, afin de produire une gamme de petites molécules utilisables soit pour des carburants (Pyrowave en France, PK Clean et Agilyx aux États-Unis), soit pour la régénération de monomères puis de polymères (Fuenix Ecogy aux Pays-Bas).

Cependant, toutes ces technologies innovantes présentent encore de fortes contraintes et limites, en termes de nature et de qualité des polymères pouvant être traités, de vitesse de traitement, de devenir des réactifs et des solvants, de rendements, de mise en place de filières industrielles et, *in fine*, de coûts environnementaux, économiques et sociétaux.

Les recherches portent aussi sur les bioplastiques, terme imprécis qui regroupe plusieurs catégories de matériaux. La plupart des bioplastiques développés ne sont que des plastiques biosourcés, c'est-à-dire issus de la biomasse. Leur seul intérêt est de remplacer le pétrole par des ressources agricoles et renouvelables (sucre, maïs) pour obtenir des matériaux de type polyéthylène (PE) ou PET (bio-PE ou bio-PET) strictement identiques aux plastiques d'origine pétrochimique, dont les déchets présentent par conséquent la même dangerosité.

## UN ESPOIR : LES PLASTIQUES BIODÉGRADABLES

L'avenir se joue avec une autre catégorie de bioplastiques : celui des plastiques biodégradables en conditions naturelles, qui sont capables de réintégrer en totalité le cycle naturel du carbone et donc de participer à une véritable économie circulaire. Les vrais biodégradables se distinguent par le label « OK compost Home » (certifié par l'entreprise internationale TÜV Austria), qui garantit que les plastiques disparaissent bel et bien en conditions domestiques comme n'importe quelle feuille végétale.

Par exemple, la société Novamont, en Italie, développe des plastiques biodégradables tels que les sacs doux au toucher des rayons de fruits et légumes des supermarchés, constitués en partie d'amidon de pomme de terre et en partie d'un polymère biodégradable issu du pétrole (le polybutyrate adipate téréphtalate).



La barquette entièrement biosourcée et biodégradable développée à l'Inrae de Montpellier par l'autrice et ses collègues. Elle est fabriquée à partir de PHA (polyesters synthétisés par des bactéries) et de paille de blé. La main montre des granulés de PHA et de la paille de blé réduite en poudre.

On cherche par ailleurs des substituts au plastique. Les exemples sont nombreux. L'université de Bretagne et l'entreprise Eranova misent sur l'utilisation d'algues locales telles qu'*Ulva armoricana* pour remplacer une partie du plastique. Dans la région de Grenoble, les chercheurs de l'université et du Centre technique du papier travaillent à améliorer les propriétés barrières des papiers et des cartons, sans altérer leur biodégradabilité naturelle, pour concurrencer les plastiques d'emballage. Plusieurs sociétés (L'embeillage, Cirophane, Abeego…) commercialisent des tissus enduits de cire d'abeille lavables et réutilisables pour emballer nos aliments à domicile. En Thaïlande, la chaîne de supermarchés Rimping emballe tous ses fruits et légumes dans des feuilles de bananier, parfaitement biodégradables.

Dans notre unité de recherche, à l'Inrae de Montpellier, et en collaboration avec de nombreux partenaires à l'étranger, nous nous focalisons sur les plastiques destinés à l'agriculture et aux emballages alimentaires. Ces derniers ont un rôle essentiel dans la réduction des pertes alimentaires en isolant l'aliment et en créant une atmosphère favorable à sa conservation. Ils évitent sa contamination par des microorganismes ou des substances indésirables qui détériorent ses qualités ou le rendent impropre à la consommation.

Nous cherchons à optimiser la balance «bénéfices-coûts» des emballages en suivant quatre lignes directrices : éviter l'usage du matériau ou réduire sa consommation au strict nécessaire ; favoriser sa réutilisation ; favoriser son recyclage ; enfin, le plus important, veiller




### À LIRE

**NATHALIE GONTARD a récemment publié, avec Hélène Seingier, Plastique, le grand emballement (Stock, 2020). Cet ouvrage, fruit de trente ans de travaux et de réflexions sur les plastiques, s'adresse au grand public afin de fournir à chacun les connaissances essentielles sur ces matériaux et leurs problèmes, condition nécessaire pour faire des choix éclairés.**

© Lorie Guilbert

à ce que le matériau soit capable de réintégrer l'un des cycles biogéochimiques naturels. En d'autres termes, nous cherchons d'une part à mieux comprendre et maximiser le rôle positif des plastiques, qui est de réduire les pertes et gaspillages de denrées alimentaires ainsi que les risques sanitaires, et d'autre part à minimiser leurs impacts à long terme sur la santé et l'environnement.

Par ailleurs, avec tous les acteurs de la chaîne alimentaire et en collaboration avec une équipe spécialisée en intelligence artificielle, nous avons développé des outils d'aide à la décision, qui permettent d'anticiper et de comparer les avantages d'un emballage par rapport à un autre. Ils sont accessibles, dans leur version de base, sur la plateforme Plasticnet (http://plasticnet.grignon.inra.fr/IateTools/). Nous cherchons maintenant à traduire les informations fournies par nos outils en indicateurs synthétiques, qui offriraient aux acheteurs un diagnostic écologique simple pour chaque emballage disponible, établi sur les trois phases de son cycle de vie (son élaboration, son usage et son devenir après usage, y compris à long terme).

## UN MATÉRIAU POUR BARQUETTE ÉCOLOGIQUE

Dans le cadre de trois grands projets européens que nous avons coordonnés, nous avons développé, en prenant appui sur nos outils de modélisation et d'aide à la décision, une barquette écologique à usage alimentaire (*voir la photo page ci-contre*). Cette barquette est fabriquée à une échelle préindustrielle par injection et moulage d'un matériau composite à base de polyhydroxyalcanoates, ou PHA (des polyesters synthétisés par des bactéries). La réduction globale de son coût de production est aujourd'hui entre les mains des industriels.

Ces PHA sont obtenus à partir d'effluents liquides issus de l'agriculture ou de l'industrie alimentaire, tels que des eaux usées d'huileries ou de fromageries, et de cultures microbiennes adaptées. Aux PHA on ajoute ensuite des poudres obtenues à partir de sous-produits solides tels que de la paille de blé ou des sarments de vigne. L'ajout de ces résidus agricoles non utilisés pour l'alimentation humaine ou animale réduit le coût économique et environnemental des PHA tout en optimisant les propriétés fonctionnelles du matériau composite, sans compromettre sa biodégradabilité.

Cette barquette de nouvelle génération utilise uniquement des ressources renouvelables qui n'entrent pas en compétition avec les usages alimentaires. Elle est réutilisable et, après usage, entièrement biodégradée en quelques mois par les microorganismes du sol. Nous nous concentrons à présent sur la dernière phase du cycle de vie de cet emballage en essayant de développer un procédé de recyclage et de décontamination adapté à la sensibilité thermique des PHA, ainsi qu'une valorisation biologique en fin de vie par méthanisation avec production de biogaz et de fertilisant.

Nous avons aussi développé des additifs nanostructurés à base d'argiles lamellaires et de nanobilles de fer, spécialement conçus pour renforcer les propriétés «barrière à l'oxygène» de nos matériaux lorsqu'ils sont destinés à emballer des aliments très sensibles à l'oxydation.

## ÉLIMINER LES PLASTIQUES INUTILES

Ces exemples de travaux et d'innovations montrent qu'il est possible de développer des matériaux recyclables et biodégradables capables de remplacer les plastiques classiques dans un certain nombre d'applications. Mais il est important de souligner qu'il n'existe aucune solution miracle. Même si toutes les innovations technologiques en cours sont mises bout à bout, elles ne couvriront jamais qu'une partie de l'étendue immense du problème posé par les plastiques et ne permettraient que de maintenir le débit actuel, sans le réduire efficacement, d'émission massive de microplastiques dans l'environnement.

Alors, ne faut-il pas fermer autant que possible le robinet avant de se jeter sur les serpillières pour éponger une maison inondée? En amont, des efforts sont en effet consentis pour éliminer les plastiques inutiles. Ceux dits «à usage unique» ont été les premiers visés, et nous nous passons à présent très bien des sacs de sortie de caisse ou des cotons-tiges en les remplaçant par leurs équivalents biodégradables en coton ou en carton. De même, la vente en vrac de certains aliments se développe et bon nombre de fruits et légumes frais devront bientôt se passer de leurs habits de plastique (loi Agec – antigaspillage pour une économie circulaire – et Plan national santé-environnement 4 ou PNSE 4).

Identifier les plastiques indispensables et éliminer ceux qui ne le sont pas est un chantier énorme que chaque individu, chaque corps de métier, chaque secteur de l'économie doit prendre à bras-le-corps, avec le soutien de la recherche. Plus globalement, le problème de la pollution plastique est un sujet complexe et difficile à appréhender sous toutes ses facettes. Ses enjeux économiques, environnementaux et de santé publique sont immenses. Mais il subsiste beaucoup d'incertitudes et d'ignorance sur les impacts des déchets plastiques à long terme, et donc sur les impacts réels des innovations censées y remédier. La science a pris du retard sur l'étude du devenir des plastiques longtemps après leur utilisation. Elle doit le rattraper. ■




## TRIBUNES DU MUSÉUM

**NATHALIE GONTARD interviendra le samedi 3 juillet après-midi lors de la Tribune Plastiques : l'overdose ? du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.**

**Événement gratuit, informations sur mnhn.fr/tribunes-plastiques**

## BIBLIOGRAPHIE


C. David *et al.*, **Using life cycle assessment to quantify the environmental benefit of upcycling vine shoots as fillers in biocomposite packaging materials,** *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 738-752, 2021.

F. Coffigniez *et al.*, **The use of modelling tools to better evaluate the packaging benefice on our environment,** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, article 634038, 2021.

M. S.-L. Yee *et al.*, **Impact of microplastics and nanoplastics on human health,** *Nanomaterials*, vol. 11, article 496, 2021.

V. Guillard *et al.*, **The next generation of sustainable food packaging to preserve our environment in a circular economy context**, *Frontiers in Nutrition*, vol. 5, article 121, 2018.

N. Gontard *et al.*, **A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy**, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 48(6), pp. 614-654, 2018.



## L'ESSENTIEL

> Depuis les années 1950, plusieurs milliards de tonnes de plastiques se sont accumulées dans l'environnement, où ils persistent sous la forme de fragments de différentes tailles allant jusqu'à l'échelle nanométrique.

> Cette pollution en cache une autre : celle des multiples additifs, impuretés, produits secondaires et monomères qui, outre les polymères issus du pétrole, interviennent dans la composition des plastiques.

> De telles substances entrent aussi dans la composition des bioplastiques. Libérées au fil du temps, elles contaminent les liquides, les solides et l'air environnants.

> Les scientifiques développent de nouvelles méthodes pour évaluer leurs effets sur la santé et l'environnement.

## L'AUTEUR



**JEAN-BAPTISTE FINI**
professeur et biologiste spécialiste des perturbateurs endocriniens au sein du laboratoire Physiologie moléculaire et adaptation, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

# La pollution invisible des plastiques

Contenants, vêtements, pneus, meubles, masques… Quelle que soit leur utilisation, les plastiques contiennent de multiples substances qui diffusent dans l'environnement. On commence à mesurer l'ampleur du phénomène.

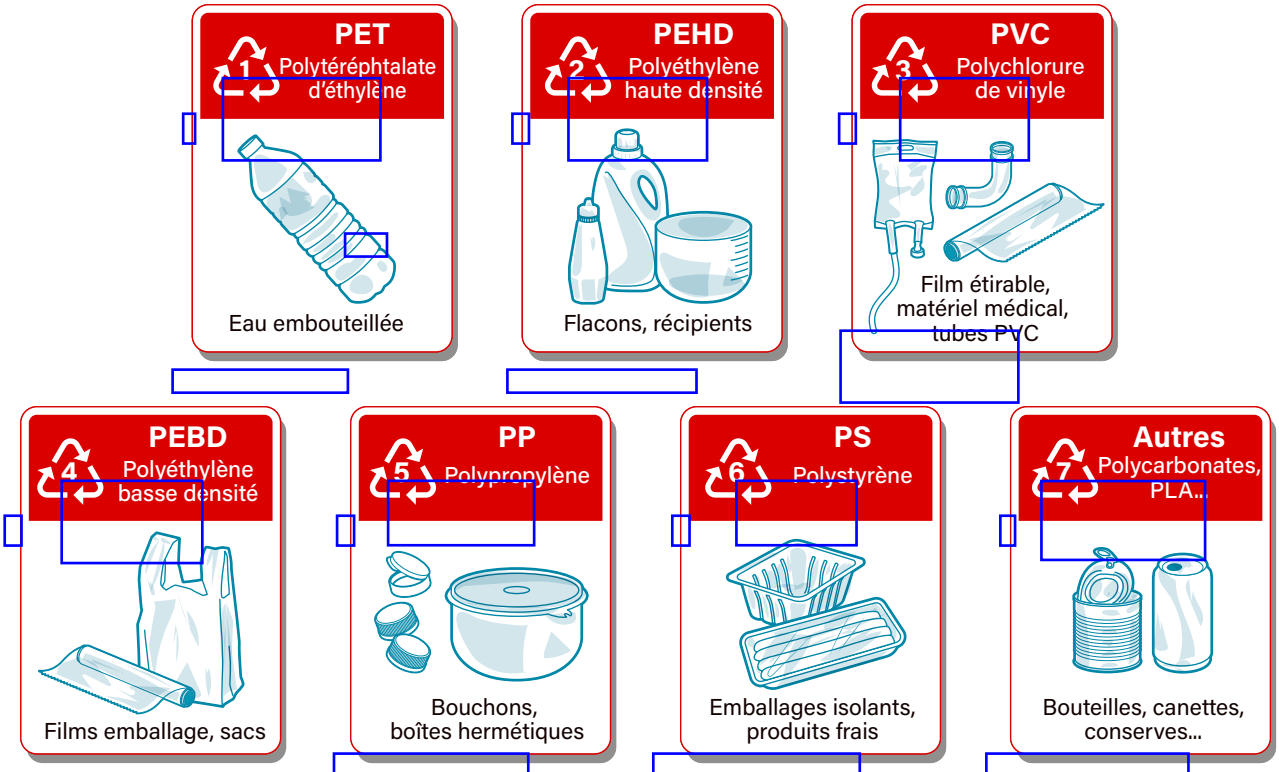
Chaque année, les humains déversent plus de 100 millions de tonnes de déchets plastiques dans la nature. De fait, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, le plastique a envahi nos sphères professionnelles et privées et fait partie intégrante de notre vie quotidienne. Dans cette ère du « Plastocène », l'humanité a produit 8,3 milliards de tonnes de plastiques entre 1950 et 2015, selon les estimations de Roland Geyer, de l'université de Californie à Santa Barbara, Jenna Jambeck, de l'université de Géorgie, aux États-Unis, et leurs collègues. Et la production ne cesse de croître : à hauteur de 2 millions de tonnes en 1950, elle atteignait près de 400 millions de tonnes en 2015, dont près de 40 % d'emballages.

Aujourd'hui, quelque 6 milliards de tonnes de plastiques se seraient accumulées dans la nature, dont une part non négligeable dans les océans – le tristement célèbre septième continent. Selon la même équipe, durant la seule année 2015, entre 5 et 14 millions de tonnes de déchets plastiques auraient atteint la mer. En effet, que ce soit sur terre ou en mer, ces déchets ne se décomposent pas. Qu'ils soient ingérés ou non, ils se fragmentent peu à peu jusqu'à devenir des microplastiques, voire des nanoplastiques (*voir l'encadré page 57*).

Or cette pollution bien visible, à l'œil nu ou au microscope, cache une pollution plus insidieuse : celle des multiples composés entrant dans la fabrication des plastiques aux côtés des polymères qui les constituent. En effet, on s'est aperçu ces dernières années qu'au fil du temps, ces composés se détachent peu à peu des polymères plastiques et diffusent dans l'environnement. Un phénomène dont on commence à saisir l'ampleur et les effets potentiels sur la santé et l'environnement.

Les plastiques sont des matériaux abordables et peu coûteux à produire, légers, résistants et polyvalents. Les principaux polymères

©Shutterstock.com/Ljupco Smokovski




utilisés pour les fabriquer sont classés en sept familles repérées par un numéro et une icône qui indique qu'en théorie ces plastiques sont recyclables (*voir la figure ci-dessus*). En pratique, c'est loin d'être le cas (*voir l'article de Nathalie Gontard page 46*). À côté de ces sept familles, notamment très utilisées pour les contenants alimentaires, les industriels développent constamment de nouvelles formulations fondées sur des mélanges complexes de monomères différents. Mais, quel que soit le plastique considéré, d'un point de vue chimique, ses composés principaux – les monomères qui s'assemblent pour former les polymères – ne sont pas ses seuls composants. Les industriels utilisent de multiples additifs en quantités variables dans leurs formulations.

## DE MULTIPLES ADDITIFS

Ces additifs tels que des plastifiants, des retardateurs de flamme, des stabilisateurs, des antioxydants ou des pigments permettent de modifier l'aspect du plastique ou d'améliorer sa fonctionnalité. Outre ces additifs, on trouve aussi dans les plastiques des monomères non polymérisés et des substances ajoutées non intentionnellement (ou Nias, pour *Non-intentionally added substances* dans la réglementation européenne), comme des impuretés et produits secondaires ou de dégradation. Or la plupart de ces éléments ne sont pas chimiquement liés de manière covalente au polymère. Ils peuvent donc être libérés lors du cycle de vie des plastiques soit par migration vers des liquides ou des solides soit par volatilisation. Il en résulte un transfert de ces substances dans les produits alimentaires emballés ainsi que dans les environnements humains (air intérieur, poussières domestiques) et naturels (les rivières et les mers).

Plus de 1 200 études scientifiques démontrent clairement la migration de plusieurs molécules à partir de matériaux plastiques en contact avec les aliments. Cette migration est augmentée par la température, la durée de stockage et la composition chimique de l'article en contact. Pour les aliments, l'épaisseur de la couche en contact avec les aliments et la taille de l'emballage sont aussi des paramètres aggravants, la migration étant proportionnellement plus élevée dans les emballages de petite taille en raison de l'augmentation du rapport surface/volume. Du simple fait de leur abondance, les matières plastiques constituent donc une source importante d'exposition humaine à ces substances. Avec quels effets sur la santé et l'environnement ? C'est toute la question.

Un exemple édifiant des effets potentiels de ces molécules sur la santé humaine est venu des travaux d'Ana Soto et Carlos Sonnenschein, de l'université Tufts, à Boston, et leurs collègues, en 1991. Ces chercheurs avaient développé un test fondé sur la prolifération de cellules humaines de cancer du sein sous l'action d'œstrogènes, les hormones féminines. Ce test permettait d'évaluer le pouvoir anticancéreux de médicaments potentiels. De façon fortuite, ces biologistes se sont aperçus que le *p*-nonylphénol, un tensioactif utilisé dans une nouvelle formulation de tubes en plastique (et toujours utilisé dans de multiples formulations), faisait proliférer

LES SEPT PRINCIPALES FAMILLES DE PLASTIQUES

**Dans le paysage des plastiques, ces quelques familles sont surreprésentées pour raisons économiques. Elles interviennent dans la fabrication de nombreux contenants et emballages destinés à être en contact avec des aliments et des boissons.**

© Bruno Bourgeois

les cellules cancéreuses de leur test de manière similaire à l'hormone naturelle 17β-œstradiol, et ce à des quantités auxquelles nous pouvons être exposés.

Un autre exemple bien connu est celui du bisphénol A, monomère utilisé pour fabriquer les plastiques en polycarbonate et reconnu comme perturbateur endocrinien – c'est-à-dire comme agent exogène qui perturbe le fonctionnement des hormones et induit des effets délétères sur un individu ou sa descendance. En France, jusqu'en 2010, il est entré dans la composition des biberons et, jusqu'en 2015, dans celle de nombreux contenants alimentaires, avant d'être interdit. Même si le bisphénol A n'est pas censé migrer du plastique vers le contenu, de faibles quantités non polymérisées sont susceptibles d'être libérées et absorbées. En 2017, l'Agence européenne des produits chimiques (Echa) a reconnu le bisphénol A comme substance très préoccupante, mais la plupart des pays européens l'utilisent encore.

Pour autant, les molécules de substitution promues – les bisphénols F et S – ne sont pas inertes. Cela est d'autant plus inquiétant que nous sommes tous exposés à ces molécules et imprégnés, comme l'a montré Santé publique France en 2019 avec l'étude Esteban. Menée sur 897 adultes et 500 enfants de France continentale, cette étude a révélé la présence de bisphénols A, S et F chez la quasi-totalité des personnes de la cohorte.

D'autres molécules particulièrement préoccupantes sont les phtalates, utilisés comme plastifiants pour assouplir les plastiques ou les rendre non coupants. Ces molécules ne sont pas liées de manière covalente aux plastiques et diverses études ont montré que certains composés à courte chaîne (le diéthylhexylphtalate ou DEHP, notamment) peuvent empêcher l'action des hormones masculines et perturber le fonctionnement des hormones thyroïdiennes. Or leurs métabolites ont été détectés dans 80 à 99 % des échantillons d'adultes et d'enfants de l'étude Esteban, ainsi que chez 92 % à 98 % de la population générale des États-Unis, selon une autre étude menée en 2014 sur quelque 11 000 participants.

Ainsi, diverses molécules entrant dans la composition des plastiques sont susceptibles de s'en détacher et de prendre la place d'hormones naturelles ou de bloquer leurs actions. Mais la législation avance lentement. Pas simple en effet de démontrer l'effet délétère d'une substance contenue dans des plastiques, surtout s'il apparaît plusieurs décennies après l'exposition, par exemple quand celle-ci concerne de futurs parents durant la vie fœtale de l'enfant ou même avant.

## 5 300 FORMULATIONS DE POLYMÈRES

D'autant que le nombre de molécules autorisées pour la formulation des plastiques est vertigineux – et celui des formulations l'est tout autant ! Aujourd'hui, plus de 5 300 formulations de polymères sont disponibles dans le commerce et plus de 4 000 substances connues sont associées aux seuls emballages plastiques. Or selon une récente analyse de Jane Muncke, de la fondation suisse Food Packaging Forum, et ses collègues, environ 12 000 substances sont

### EN CHIFFRES

**4,9 milliards de tonnes**
Sur les 8,3 milliards de tonnes de plastiques produites entre 1950 et 2015, 4,9 milliards de tonnes, soit 60 %, n'ont été ni recyclées ni incinérées et se sont accumulées dans la nature. Ces déchets plastiques pourraient atteindre 12 milliards de tonnes en 2050.

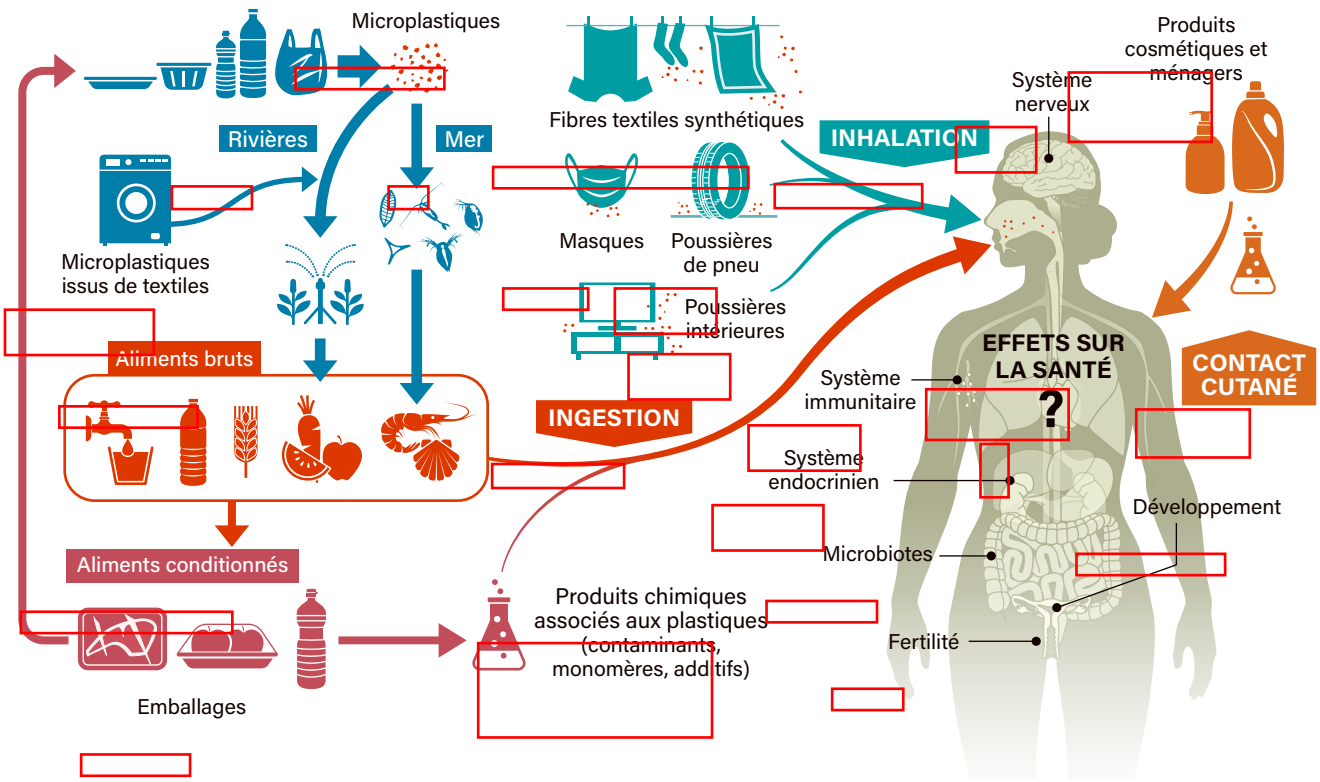
**640 000 à 1 500 000**
C'est le nombre de microfibres plastiques libérées durant le lavage en machine de 1 kilogramme de vêtements synthétiques, selon les caractéristiques du textile lavé. La majorité de ces microfibres sont assez petites pour traverser les filtres des stations d'épuration.

**12 000**
Environ 12 000 additifs intervenant dans la composition de contenants en plastique et entre 30 000 et 100 000 substances ajoutées non intentionnellement sont susceptibles de migrer vers des aliments par contact.

Sources des chiffres : R. Geyer *et al.*, *Science Advances*, vol. 3, e1700782, 2017 ; F. De Falco *et al.*, *Sci. Rep.*, vol. 9, 6633, 2019 ; J. Muncke *et al.*, *Environ. Health*, vol. 19, 25, 2020.

Les principales catégories d'additifs entrant dans la composition des plastiques

| Catégories | Exemples de substances | Informations supplémentaires |
|---|---|---|
| Plastifiants | Phtalates, paraffines chlorées | Environ 80 % sont utilisés dans les plastiques en PVC, 20 % dans ceux en cellulose. |
| Retardateurs de flamme | Paraffines chlorées, tétrabromobisphénol A | |
| Antioxydants et stabilisants aux UV | Bisphénol A, composés en cadmium et en plomb, phénols, phosphites | Leur quantité dépend de leur structure et de celle du polymère plastique. |
| Stabilisants thermiques | Composés en cadmium et en plomb, nonylphénol | Utilisés principalement dans le PVC |
| Biocides | Composés à l'arsenic, triclosan | Utilisés principalement dans le PVC mou et les mousses de polyuréthanes |
| Pigments | Composés de cadmium, chrome, plomb, dioxyde de titan | |
| Solvants, catalyseurs | Antimoine dans le PET | Permettent la production |




**Notre organisme est en contact avec des microplastiques et des substances chimiques associées aux plastiques (additifs, monomères, contaminants) de multiples façons. Une bouteille d'huile de tournesol, par exemple, contient de l'huile produite à partir de plantes arrosées avec de l'eau contaminée en microparticules issues des déchets plastiques et des lavages de textiles synthétiques. On ingère donc à la fois ces particules, mais aussi les substances associées au plastique de la bouteille et qui ont diffusé dans l'huile. Avec quels effets sur la santé, sachant que plusieurs substances sont déjà connues indépendamment pour perturber certaines fonctions ?**

susceptibles d'être ajoutées intentionnellement. Et on estime que dix fois plus de Nias peuvent migrer dans les aliments à partir de divers articles en contact avec eux. Mais la plupart de ces contaminants restent inconnus, faute de méthodes d'analyse chimique appropriées. À titre de comparaison, environ 1000 pesticides sont en usage commercial actuellement, et des méthodes d'analyse chimique sont disponibles pour tous ces pesticides, y compris leurs principaux métabolites.

Cette complexité chimique remet en question les approches actuelles d'évaluation de la sécurité des plastiques, notamment en ce qui concerne les matériaux en contact avec les aliments. Alors que les risques liés aux substances principales et aux additifs sont évalués avant l'autorisation de la mise en contact avec des aliments, cette approche ne tient compte ni des Nias ni des effets synergiques potentiels de mélanges. Pour remédier à ces difficultés, deux pistes sont explorées. La première est la recherche d'autres solutions plus sûres. Les bioplastiques ? À première vue, ils semblent la solution idéale, conciliant l'utilisation d'un matériau bon marché et polyvalent et la conservation d'un environnement sans plastique apparent. Mais la réalité est tout autre.

## L'ILLUSION DES BIOPLASTIQUES

Le terme « bioplastique » est ambigu, car il désigne à la fois des matériaux fabriqués à partir de matières premières renouvelables biosourcées, comme le biopolyéthylène, mais aussi des matériaux biodégradables (comme le polysuccinate de butylène), ou les deux (par exemple l'acide polylactique ou PLA). Il n'est pas encore clair si ces matériaux et d'autres à base de plantes qui sont souvent mélangés à des matériaux synthétiques (les matériaux à base d'amidon, de cellulose ou de bambou, par exemple) relèvent de la définition des bioplastiques. Une chose est sûre : l'étanchéité ou la résistance des produits est acquise dans la plus grande majorité des cas grâce à un film plastique (*liner*) ou à l'ajout de polymère plastique dans la masse. Dans tous les cas, ils sont produits pour remplir la même fonction que les matières plastiques et apparaissent aux yeux du consommateur, faussement pour la plupart, comme des substituts pertinents, car plus « naturels ».

Souvent, les industriels commercialisant les bioplastiques mettent en avant leur biodégradabilité et leur inertie vis-à-vis de la santé. Cependant, peu de preuves scientifiques soutiennent cette notion. Par exemple, certains plastiques dits « biodégradables » ne se dégradent pas dans des milieux naturels, le cycle de recyclage exigeant un environnement industriel avec des températures supérieures à 70 °C. De plus, lors de l'évaluation et de l'amélioration de la performance environnementale des bioplastiques et des alternatives plastiques, l'accent est mis soit sur la phase de production (l'empreinte carbone, les matières premières renouvelables…), soit sur la fin de vie (la dégradabilité). L'exposition humaine

© Bruno Bourgeois

aux produits chimiques est souvent négligée. Aussi sait-on très peu de choses en termes de sécurité chimique des bioplastiques, c'est-à-dire sur l'identité des composés présents dans le matériau et leur toxicité, ainsi que sur l'exposition humaine à ces composés. Ces lacunes sont problématiques, car l'exposition humaine aux substances provenant des bioplastiques et des matériaux d'origine végétale va augmenter avec leur utilisation croissante.

Enfin, comme les plastiques classiques, les plastiques biosourcés ou dits «biodégradables» peuvent contenir des monomères non polymérisés, des additifs et des Nias. Pire, les additifs sont même particulièrement importants pour les polymères extraits de ressources naturelles, comme l'amidon et la cellulose type boîte d'œufs, ou de microorganismes, comme le PLA, car leurs propriétés physiques – résistance thermique, propriétés de barrière… – sont limitées. Et comme la plupart de ces composés ne sont pas liés de manière covalente au polymère, ils peuvent aussi être transférés dans l'air, les solides et les liquides.

En 2020, une équipe autour de Martin Wagner, de l'université norvégienne de Sciences et de Technologie, a évalué la toxicité d'une vingtaine de bioplastiques (dont certains à base de bambou ou de cellulose) selon une méthodologie similaire à celle qu'elle avait utilisée un an plus tôt pour les plastiques classiques. Après avoir découpé une partie des contenants alimentaires en bioplastique, les chercheurs en ont extrait le maximum de composés à l'aide de solvants, puis ont évalué par spectrométrie de masse le nombre de molécules transférées du plastique vers le solvant. Ils ont ensuite analysé sur des cellules leur toxicité et leurs effets hormonaux.

Ils ont ainsi montré que des milliers de substances (connues et non connues) composaient ces bioplastiques et que les trois quarts de ces bioplastiques étaient toxiques ou perturbaient les gènes impliqués dans la réponse aux hormones (leur étude sur les plastiques conventionnels avait montré des résultats similaires). Cette étude offre donc l'avantage de montrer que la plupart des bioplastiques sont à considérer comme des plastiques classiques, mais le fait d'avoir utilisé des solvants est discutable, car d'un usage peu réaliste. Mais de nouvelles approches devraient bientôt permettre d'évaluer les effets biologiques de molécules migrant réellement dans les aliments (*voir l'encadré page 58*).

Ainsi, comme les plastiques, la plupart des bioplastiques sont une source majeure d'exposition humaine à de multiples composés entrant dans leur fabrication. Et les écosystèmes terrestres et aquatiques ne sont pas mieux préservés




## TRIBUNES DU MUSÉUM

**JEAN-BAPTISTE FINI interviendra le samedi 3 juillet après-midi lors de la Tribune Plastiques : l'overdose ? du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.**

**Événement gratuit, informations sur mnhn.fr/tribunes-plastiques**



## MICROPLASTIQUES, NANOPLASTIQUES ET SANTÉ

Omniprésents dans l'environnement, les microplastiques et nanoplastiques proviennent principalement de la dégradation des plastiques à usage unique, des engins de pêche, des vêtements et des cosmétiques, des peintures, des pneus et de la poussière urbaine. En raison de leur faible densité, une part importante se retrouve dans les rivières et la mer. Leur présence dans la nature entraîne une accumulation au sein des organismes et, par conséquent, dans les chaînes trophiques, dont la chaîne alimentaire humaine. C'est un sujet de préoccupation majeur en raison des effets possibles sur la santé et l'environnement.

La problématique est double. D'une part, quels sont les effets sur les organismes ? Si au-delà de 10 micromètres, le risque que les particules de plastique pénètrent dans les cellules est faible, celles de taille inférieure à 10 micromètres sont susceptibles d'y entrer par divers mécanismes (phagocytose, endocytose…). D'autre part, ces particules aggravent-elles l'exposition aux substances qui composent les plastiques ? Rien ne permet d'éliminer cette possibilité. Le dioxyde de titane, par exemple, est très utilisé dans la fabrication de plastiques pour sa pigmentation blanche et sa résistance. Or il se présente lui-même sous la forme de particules de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres dont diverses études suggèrent qu'elles pourraient perturber le fonctionnement des cellules. Quel effet a-t-il lorsqu'il est encore associé aux microplastiques ?

Ces questions sont largement débattues actuellement, à commencer par leur prérequis : quelle est notre exposition ? La réponse est loin d'être claire. Une abondante littérature existe sur la présence des microplastiques dans les aliments, s'appuyant sur un large éventail de méthodes pour isoler, compter et analyser ces particules dans les différents aliments, ce qui complique l'estimation. En 2020, en compilant les données de telles études, Juan Conesa et Maria Iñiguez, de l'université d'Alicante, en Espagne, ont ainsi évalué qu'un humain ingère en se nourrissant 22 à 37 milligrammes de microplastiques par an. Mais de leur côté, Kala Senathirajah, de l'université de Newcastle, en Australie, et ses collègues ont estimé, à partir de 59 publications mesurant la quantité de microplastiques présents dans la nourriture, les boissons, l'eau et l'atmosphère, qu'une personne en ingère entre 0,1 et 5 grammes (l'équivalent d'une carte bancaire) par semaine. Et encore tout récemment, l'équipe d'Albert Koelmans, à l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, a estimé par modélisation qu'en moyenne, *via* l'air ou la nourriture, un adulte est exposé à 0,2 milligramme de microplastiques par an, soit bien moins que dans les deux autres études.

Quant aux nanoplastiques, encore peu d'études ont évalué leur présence dans la chaîne alimentaire humaine, probablement du fait de l'absence de méthodologies validées et standardisées.

**J.-B. F.**

© Shutterstock.com/Ukrolenochka

pour autant, car ces matériaux se désagrègent plus facilement en microparticules.

La seconde piste pour limiter les risques des plastiques et de leurs composés est d'envisager de nouvelles méthodologies pour évaluer leurs effets en amont et de modifier en conséquence les réglementations sur les plastiques. Lorsque ces dernières, et en particulier celles sur les produits en contact avec les aliments, ont été mises en place dans les années 1970, on admettait généralement que les expositions chimiques de faible niveau, c'est-à-dire inférieures à la dose sans effet toxicologique établi, présentaient des risques négligeables pour les consommateurs. Toutefois, des études plus récentes ont montré que cette hypothèse n'est pas valide dans tous les cas : l'exposition à de faibles concentrations suffit parfois à perturber le système endocrinien et induire des effets néfastes sur la santé.

Par exemple, en recherchant une trentaine de molécules connues pour être des perturbateurs endocriniens ou suspectées de l'être (phtalates, bisphénol A, perfluorés…) dans les urines de la cohorte Selma, rassemblant plus de 1800 paires mère-enfant, nous avons établi, au sein d'une collaboration internationale, une corrélation entre l'exposition *in utero* à un mélange de 11 molécules et un retard de langage des enfants à 3 ans. Nous avons aussi validé chez la grenouille et le poisson-zèbre que ce mélange perturbe plusieurs axes hormonaux, notamment les hormones thyroïdiennes et de la reproduction. Or, *a priori* (le doute est permis concernant les perfluorés), les substances du mélange étaient présentes à des doses inférieures aux doses réglementaires dans l'environnement des femmes étudiées. Surtout, cette étude montre que l'évaluation du risque actuellement fondée sur une évaluation individuelle des molécules n'est pas du tout adaptée à la réalité de l'exposition aux mélanges.

Il est donc légitime de s'interroger sur la pertinence de la réglementation actuelle et des méthodes employées. Pour la grande majorité des plastiques, cosmétiques, pesticides, seules les molécules majoritaires entrant dans leurs formulations sont testées. Pour les plastiques, la plupart du temps, seul le monomère est mesuré (styrène dans le polystyrène, le propylène dans le polypropylène, etc.).

## UNE RÉGLEMENTATION INAPPROPRIÉE

Le règlement européen (CE n°1935/2004) préconise que les substances cédées par les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires ne doivent pas entraîner de modifications inacceptables de la composition des denrées. Les bonnes pratiques de fabrication permettent de produire des matériaux en matière plastique qui ne cèdent pas plus de 10 milligrammes de substances par décimètre carré de surface du matériau. Cette limite de migration globale correspond, pour un emballage cubique contenant 1 kilogramme de denrées alimentaires, à une migration de 60 milligrammes.

Or ce règlement et les normes sont fondées sur les niveaux de seuil des molécules simples utilisées pour fabriquer les contenants et ne prennent en considération ni l'âge d'exposition ni les effets à faibles doses des molécules, ni le fait que nous sommes exposés à un mélange de molécules. Ainsi, des substances interdites pour certains usages peuvent être autorisées dans les plastiques en contact avec les aliments si leur migration dans ces derniers est inférieure à la limite de détection de 10 microgrammes par kilogramme d'aliments, et s'ils ne sont pas

### COMMENT LIMITER NOTRE EXPOSITION AUX PLASTIQUES OU À LEURS ADDITIFS

> Ne pas réchauffer les aliments au four à microondes dans des barquettes ou poches en plastique. Les transvaser dans des récipients en verre.

> Ne pas réutiliser des bouteilles plastiques pour le stockage de l'eau.

> Limiter le stockage des aliments dans des contenants en plastique, même à froid.

> Limiter l'usage de film alimentaire, surtout lorsqu'il est en contact direct avec les aliments. Préférer les films en tissu ciré.

> Manger dans des contenants inertes.

> Aérer.

## QUELLES BARQUETTES POUR LA CANTINE DES ÉCOLES ?

Adoptée en novembre 2018, la loi Egalim interdira dès 2025 l'usage de contenants en plastique dans la restauration collective accueillant des enfants. Les contenants en acier inoxydable et en verre utilisés historiquement étant lourds et leur système de nettoyage encombrant, de nombreuses communes ont orienté leur choix vers des contenants en bioplastique à base de cellulose, légers et jetables, ou pourraient le faire. Or aucune norme n'oblige à évaluer les effets de la formulation complète de ces barquettes alimentaires sur la santé. Cela est d'autant plus vrai pour les composés néoformés lors du réchauffage des aliments. De plus, si les effets biologiques, dont la perturbation hormonale, ont été parfois évalués, ils n'étaient effectués que sur des fragments de barquettes dissous et sur des modèles cellulaires.

Avec des collègues du CNRS, du Muséum national d'histoire naturelle, de l'Inserm, de l'Inrae et deux partenaires industriels, le Laboratoire national de métrologie et le laboratoire WatchFrog, nous avons lancé le projet *PoLySafe*, dont l'objet est d'évaluer l'inertie de ces contenants alimentaires dans leur globalité. Il s'agira de mettre des contenants alimentaires en polypropylène, cellulose, acier inoxydable et en verre en présence de substances simulant deux types d'aliments (des solutions acide ou lipidique) avec un temps de contact déterminé et à une température représentative des conditions réelles d'utilisation. Nous obtiendrons ainsi des extraits dans lesquels des dizaines (voire des centaines ?) de substances auront diffusé. Nous testerons ces extraits sur des cellules humaines et des modèles aquatiques (xénope, poisson-zèbre…) afin d'évaluer l'activité biologique de ces mélanges de molécules, ce qui nous permettra de mesurer les risques sur le métabolisme, les perturbations thyroïdiennes, œstrogéniques et androgéniques (hormones sexuelles féminines et masculines, respectivement). Nous obtiendrons nos premiers résultats début 2022.

**J.-B. F.**

toxiques pour la reproduction et le fonctionnement de certains gènes ni mutagènes.

Dans la pratique, cette limite de détection est souvent interprétée comme un seuil de sécurité. Mais à titre de comparaison, aux États-Unis, le seuil de réglementation est 20 fois inférieur. Ces approches fondées sur un seuil sont inadéquates, car elles reposent sur l'idée que «la dose fait le poison». Or diverses études ont montré que des faibles doses peuvent engendrer des effets supérieurs à ceux produits par des fortes doses. Par exemple, chez la souris, l'exposition quotidienne au bisphénol A peut induire la prolifération de cellules cancéreuses à une dose de 2,5 microgrammes par kilogramme de poids corporel et par jour, comme l'ont montré Sarah Jenkins, de l'université de l'Alabama à Birmingham, en 2011. Et c'est aussi le cas lorsque les souris sont exposées à une dose 10 fois supérieure, mais pas pour des doses 100 et 1000 fois supérieures.

## MOINS DE MÉLANGES, MOINS DE RISQUES

Cependant, des changements sont possibles. La première chose serait de réduire la complexité des mélanges de substances autorisées entrant dans la composition des plastiques. Le nombre de ces substances est colossal : les réglementations de l'Union européenne et de ses États membres listent un total de 8030 substances autorisées dans différents types d'articles en contact avec les aliments. Aux États-Unis, 10787 substances sont autorisées comme additifs alimentaires directs ou indirects. Ils sont généralement admis comme étant sûrs, mais ne sont pas notifiés à la Food and Drug Administration et aucun registre public sur leur utilisation n'est disponible. En général, les informations sur l'utilisation réelle d'un composé dans les matériaux plastiques (et ses concentrations d'usage) sont donc très difficiles à obtenir.

Une autre piste est de prendre en considération les effets biologiques des mélanges de molécules. En 2012, une équipe américaine autour de Youngja Park, de l'université Emory, à Atlanta, a mesuré plus de 3000 substances exogènes dans le sang humain. Elle a aussi fréquemment trouvé plusieurs de ces xénobiotiques dans le placenta et le sang du cordon ombilical des femmes enceintes testées, ce qui indique que l'exposition du fœtus à des mélanges de xénobiotiques est la norme. Les effets sur la santé de cette exposition à des mélanges pendant les premières années de la vie restent largement inconnus, mais les scientifiques s'accordent sur l'extrême importance des 1000 premiers jours, où tout l'organisme se met en place.

De nouvelles méthodes se développent dans ce sens, prenant en compte plusieurs idées qui pourraient limiter les incertitudes,

# L'innocuité des composés devrait être prouvée avant toute utilisation

comme étudier les effets de l'exposition sur les périodes de vulnérabilité, adopter des approches sans seuil, ou encore améliorer la sensibilité et la robustesse des tests utilisés. Une des pistes les plus prometteuses est d'utiliser des tests biologiques *in vitro* et *in vivo* sur des modèles alternatifs (cellules, organoïdes, xénope, poisson-zèbre ou medaka…) pour évaluer la toxicité de l'ensemble des migrations qui s'échappent du produit final.

Par rapport à l'analyse chimique de composés cibles sélectionnés, ces tests intègrent la toxicité des mélanges qui s'échappent des plastiques, les substances connues dont la toxicité est inconnue et les composés réellement inconnus. En outre, il est possible d'identifier les substances à l'origine de la toxicité en couplant les tests biologiques à l'analyse chimique. De telles approches sont en cours de développement, notamment dans notre laboratoire. Certains aspects doivent encore être améliorés, en particulier pour harmoniser les méthodes d'échantillonnage et limiter les biais, mais les premiers résultats devraient tomber dans quelques mois (*voir l'encadré page ci-contre*).

Enfin et surtout, il est primordial d'utiliser cette méthodologie en amont de la mise sur le marché. Même dans un monde idéal où l'économie circulaire fonctionnerait et où les ressources plastiques seraient mieux recyclées, il serait essentiel de s'assurer qu'aucun produit chimique dangereux n'est présent dans ces matériaux tant il est difficile de gérer efficacement leurs risques. La solution passe donc par un renforcement des tests à imposer avant la mise sur le marché.

On le voit, il est plus que jamais urgent d'inverser le postulat de départ selon lequel les composés sont sûrs jusqu'à preuve du contraire. Leur innocuité doit être prouvée avant toute utilisation. En attendant, nous avons tous un rôle à jouer à l'échelle individuelle en limitant notre utilisation des contenants et sacs plastiques, qu'ils soient «bio» ou non. ■

## BIBLIOGRAPHIE


J. Muncke *et al.*, **Impacts of food contact chemicals on human health : a consensus statement**, *Environ. Health*, vol. 19, article 25, 2020.

L. Zimmermann *et al.*, **Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics ? In vitro toxicity and chemical composition**, *Environ. Int.*, vol. 145, article 106066, 2020.

P. Darbre, **Chemical components of plastics as endocrine disruptors : Overview and commentary**, *Birth Defects Research*, vol. 112, pp. 1300-1307, 2020.

J. A. Conesa et M. E. Iñiguez, **Analysis of microplastics in food samples**, dans T. Rocha-Santos *et al.*, **Handbook of Microplastics in the Environment**, Springer, 2020.

**Imprégnation de la population française par les phtalates**, Santé Publique France, 2019.

L. Birgersson *et al.*, **From cohorts to molecules : Adverse impacts of endocrine disrupting mixtures**, Biorxiv, 2017.

**YVAN PAILLER**
est archéologue et responsable d'opération à l'Inrap Grand-Ouest et titulaire de la chaire Armerie (Archéologie maritime et recherche interdisciplinaire environnementale) instituée par l'université de Bretagne occidentale et par l'Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives). Ses travaux portent essentiellement sur le Néolithique et les débuts de l'âge du Bronze dans l'ouest de l'Europe.





**CLÉMENT NICOLAS**
est archéologue et postdoctorant Marie-Curie à l'université de Bournemouth, en Angleterre. Ses recherches portent sur les premières sociétés métallurgiques des III[e] et II[e] millénaires avant notre ère en Europe.

# La dalle de Saint-Bélec serait la plus ancienne carte connue en Europe

En 1900, une grande dalle gravée d'un réseau complexe de lignes fut mise au jour dans un tumulus breton de l'âge du Bronze. Redécouverte en 2014, elle vient d'être étudiée : il s'agit sans doute d'une carte représentant le territoire de l'un des princes qui régnaient dans la région. Clément Nicolas et Yvan Pailler, les deux principaux auteurs de l'étude, nous expliquent pourquoi.

**Cette dalle en schiste est, selon vous, la carte d'un territoire. Lequel ?**

**Yvan Pailler :** La dalle gravée du tumulus de Saint-Bélec représente la haute vallée de l'Odet et d'autres rivières environnantes à l'âge du Bronze ancien, c'est-à-dire entre 2100 et 1600 ans avant notre ère environ. L'Odet est un petit fleuve qui prend sa source dans les montagnes Noires, en Bretagne.

**Comment vous êtes-vous intéressés à cet objet ?**

**Yvan Pailler :** Pendant nos thèses de doctorat, nous avons, indépendamment l'un de l'autre, lu l'article du *Bulletin de la Société archéologique du Finistère* que lui avait consacré en 1900

Paul Du Chatellier, grand archéologue breton de la seconde partie du XIXe siècle et du début du XXe siècle.

**Clément Nicolas :** Nous en avons discuté par hasard et découvert que nous avions tous les deux la même intuition, à savoir que les gravures de la dalle constituent une carte. Nous avons testé plus tard cette idée en demandant aux enfants de CE2 et de CM2 de l'école Victor-Hugo, à Saint-Nazaire, d'interpréter spontanément la dalle. La plupart de ces enfants y ont vu une « carte » ou un « plan »...

**Et vous avez entrepris de le prouver ?**

**Yvan Pailler :** Oui, mais pour cela il nous a d'abord fallu retrouver la dalle. Hormis l'article de Du Chatellier, elle n'a pratiquement jamais été mentionnée dans la littérature scientifique, à part une fois dans les années 1990, au détour d'une phrase de Jacques Briard, grand spécialiste de l'âge du Bronze en Europe. En enquêtant, nous avons appris qu'en 1924 les enfants de Du Chatellier avaient vendu au Musée national d'archéologie, à Saint-Germain-en-Laye, la collection du musée privé d'archéologie créé au château familial de Kernuz, à Pont-l'Abbé. Nous nous sommes donc rendus à Saint-Germain-en-Laye. Là, après quelques péripéties, nous avons retrouvé la dalle de Saint-Bélec. Elle était assez mal protégée dans une cave humide. Ses conditions de conservation n'y étaient pas idéales, mais elles s'étaient déjà améliorées, puisque la dalle venait de passer pratiquement un siècle à l'air libre dans les douves du château royal de Saint-Germain-en-Laye, qui accueille le musée !

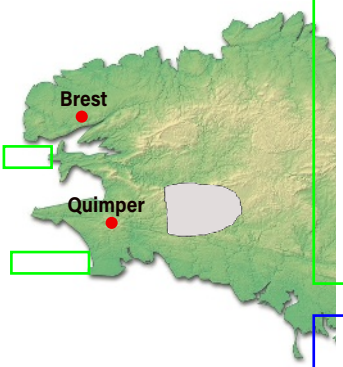
**Clément Nicolas :** Pendant cette période, elle n'avait jamais été référencée dans le patrimoine national et sa vraie origine était sur le point d'être oubliée.

**Vous connaissiez cependant bien son origine, grâce à l'article de Paul Du Chatellier ?**

**Yvan Pailler :** Absolument. Nous savions que la dalle constituait l'un des murs du caveau d'une vaste tombe, aménagée pendant l'âge du Bronze dans un champ qui se trouve aujourd'hui à 1,5 kilomètre de Leuhan, un village du Finistère. Comme à son habitude, Du Chatellier avait pratiqué une fouille en puits au centre de ce tumulus de 40 mètres de diamètre et de 2 mètres de haut, qui est aujourd'hui arasé. Comprenant l'intérêt de sa trouvaille, il était revenu trois mois plus tard avec une quinzaine d'ouvriers afin de transporter cette pierre de deux tonnes à Kernuz.

**Comment l'avez-vous étudiée ?**

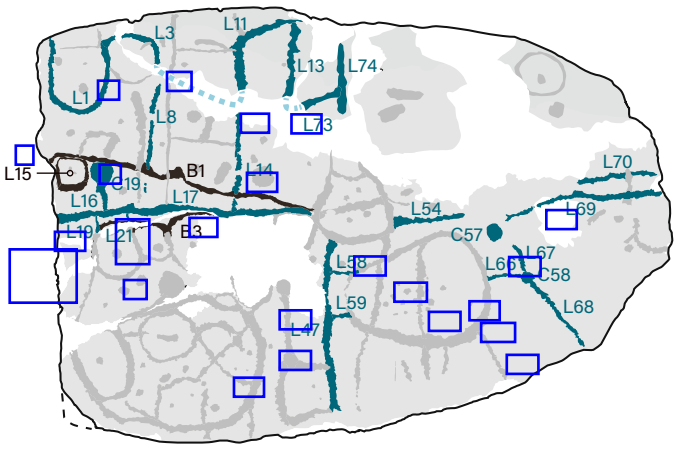
**Clément Nicolas :** Pour numériser cette dalle, nous avons commencé par faire de la





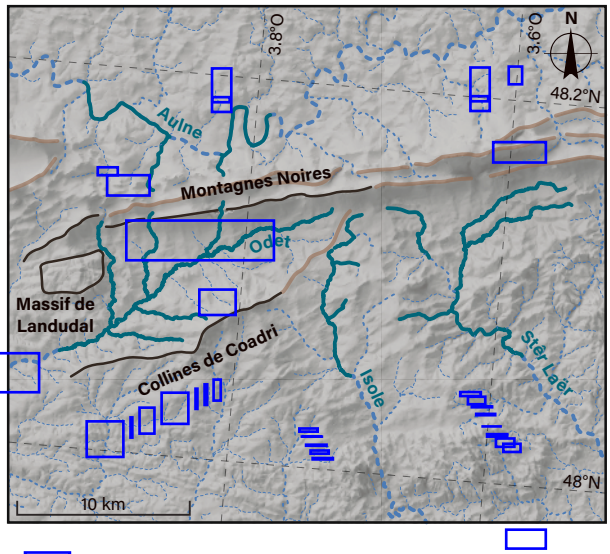

La dalle ornée de Saint-Bélec *(ici vue par le haut)* mesure environ 2 mètres de longueur, pour une épaisseur d'une quinzaine de centimètres. Elle représenterait le territoire d'environ 30 par 20 kilomètres indiqué en gris sur la carte ci-dessus.

© Yvan Pailler (dalle gravée) ; © Shutterstock.com/Schwabenblitz (fond de carte de la Bretagne)




Gravures en bas-relief interprétées comme la représentation du relief

Lignes et cupules piquetées interprétées comme la représentation du réseau hydrographique




Ligne de crête représentée sur la dalle

Ligne de crête non représentée sur la dalle

Cours d'eau représenté sur la dalle

Cours d'eau non représenté sur la dalle

**Les lignes du réseau hydrographique de la région de Leuhan, en Bretagne, correspondent à celles qui ont été gravées sur la dalle de Saint-Bélec.**

photogrammétrie, c'est-à-dire des prises de vues avec un éclairage rasant, afin de révéler les reliefs. Nous avons ensuite eu la chance de pouvoir faire beaucoup mieux. Vincent Lacombe, l'un des cosignataires de l'article relatant l'étude, s'est intéressé à l'affaire. Or il a fondé DigiScan3D, une entreprise de numérisation d'objets issus du patrimoine ou de l'industrie. Son scanner extrêmement performant a relevé en une fois les deux faces de la dalle et nous a fourni un modèle numérique en trois dimensions, avec une précision inframillimétrique.

**Yvan Pailler :** Une fois dotés de ce relevé extrêmement précis et maniable, nous nous sommes facilement rendu compte que la surface de la pierre avait été utilisée par endroits pour figurer le relief et creusée en d'autres pour marquer des structures topographiques ou anthropiques. Parmi ces bas-reliefs, dans la partie médiane de la gauche de la dalle, un grand élément triangulaire allant quasiment jusqu'au centre de la dalle nous a particulièrement interpellés.

## Les traits du relief et des cours d'eau coïncident à 80 % avec ce qui est gravé sur la dalle

**À quoi ce grand triangle correspond-il ?**

**Yvan Pailler :** Quand nous avons commencé à comparer les premiers relevés avec les cartes IGN, il nous a semblé qu'il pourrait figurer la vallée de l'Odet. Nous nous sommes alors rendus sur le tumulus, d'où l'on peut en embrasser une grande partie. En face du tumulus, on aperçoit la barre rectiligne des montagnes Noires, que symbolise vraisemblablement la ligne supérieure du triangle, tandis que sa ligne inférieure figure, d'après nous, les collines de Coadri. Entre ces deux reliefs, une ligne ramifiée marque les cours de l'Odet et de certains de ses affluents. Vers l'ouest, le massif de Landudal, de forme tabulaire, est représenté par un carré en bas-relief.

**Clément Nicolas :** Nous avons ensuite poussé le plus loin possible le petit jeu des analogies. Ainsi, la concordance entre certaines lignes et des parties du réseau hydrographique présent dans le paysage nous a frappés, notamment au nord les méandres de l'Aulne, au sud l'Isole et à l'est le Stêr Laër. Nous avons continué jusqu'à ce que les coïncidences deviennent de moins en moins certaines, puis nous nous sommes tournés vers les géomaticiens Pierre Stéphan et Julie Pierson, eux aussi cosignataires de l'étude publiée. À l'aide de leurs logiciels, ils ont analysé le réseau de lignes que nos observations définissaient et ont calculé

© Clément Nicolas

le taux de concordance entre les structures hydrographiques ou topographiques identifiées sur le terrain et ce qui, pour nous, constitue leurs représentations sur la dalle : à des déformations près, ces structures – la ligne de crête des montagnes Noires, le massif tabulaire de Landudal et les lignes tracées par les cours d'eau locaux – coïncident à 80 % avec leurs représentations sur la dalle.

**La dalle porte aussi des symboles carrés, ronds, ovales… Que représentent-ils ?**

**Clément Nicolas :** Nous ne pouvons pas répondre à cette question pour le moment. Le travail d'interprétation de ce document ne fait que commencer, mais il est déjà précieux d'avoir pu identifier le territoire représenté par cette carte de l'âge du Bronze, probablement la plus ancienne connue en Europe.

**Yvan Pailler :** Il y a toutefois un symbole qui fait exception : celui au centre de la dalle, une sorte de trapèze barré d'une ligne. C'est manifestement autour de cet élément qu'est construite toute la représentation. Nous l'interprétons comme le plan d'une enceinte fortifiée fossoyée typique de l'âge du Bronze ancien, qui aurait été le siège du pouvoir sur le territoire représenté.

**Le tumulus de Saint-Bélec est-il la tombe du détenteur de ce pouvoir ?**

**Yvan Pailler :** Non, car s'il est clair que la personne enterrée était assez importante pour avoir un tumulus, sa tombe n'a pas la somptuosité d'une tombe royale de la période. La carte suggère qu'un personnage exerçait un contrôle territorial à partir de l'enceinte centrale présumée. Mais sa tombe reste à trouver.

**Où se trouvait cette enceinte ?**

**Yvan Pailler :** En l'état actuel de nos recherches, il y a deux hypothèses : soit l'enceinte se trouvait à l'emplacement que dessine une sorte d'ellipse bocagère induite par la topographie, notamment un ruisseau, autour du bourg de Roudouallec, à 6 kilomètres au nord-ouest de Leuhan ; soit il s'agit de l'enceinte, dont il reste des parties, qui se trouvait à Castel-Ruffel, dans les montagnes Noires, sur un mamelon dominant la vallée de l'Odet et la vallée de l'Aulne.

**Clément Nicolas :** Le plan figuré par le motif central de la dalle ressemble à celui des enceintes de la même période que l'on a pu fouiller et dater, par exemple celle de Bel Air qu'a fouillée l'Inrap à Lannion, qui est associée au tumulus princier de La Motta. Ce motif central correspond sans doute à une résidence princière, à côté de laquelle devrait se trouver un tumulus monumental, même si, pour le moment, on ne connaît pas de tombe princière dans le secteur des montagnes Noires.

**Sur quelle société ces princes exerçaient-ils leur pouvoir ?**

**Yvan Pailler :** À l'âge du Bronze ancien, la vallée de l'Odet, mais aussi toute la péninsule armoricaine, était couverte par la « culture des tumulus armoricains » qui, on commence à le découvrir, s'étendait sans doute vers l'est jusqu'à la plaine de Caen. Elle est définie archéologiquement par la présence de très nombreuses tombes en fosses ou en pierre et par plus d'un millier de tombes monumentales sous tumulus, manifestement celles de notables. L'élite dirigeante était enterrée avec un ou plusieurs poignards en bronze, des pointes de flèches finement taillées et d'autres objets de prestige. On associe l'apparition de ce puissant phénomène archéologique à une évolution sociale forte, probablement la constitution d'une constellation de petits royaumes maillant le territoire et le contrôlant très bien, au point de le décrire par des cartes.

**Des cartes gravées sur de la roche ?**

**Yvan Pailler :** La dalle de Saint-Bélec est clairement une exception : quelqu'un a voulu monumentaliser la carte de son territoire. D'autres supports de carte ont pu exister à l'époque, comparables sans doute aux peaux et autres écorces dont se servaient les Amérindiens pour créer des cartes portables. En tout cas, le territoire de 30 par 20 kilomètres représenté sur la carte est à peu près de la taille que l'on attribue au territoire d'une entité politique de la culture des tumulus armoricains.

**Entre ces chefs nombreux et puissants, les conflits n'étaient-ils pas incessants ?**

**Yvan Pailler :** Non, on a l'impression de sociétés plutôt pacifiées dont les territoires se répartissaient assez uniformément sur l'ensemble de la Basse Bretagne, de la Basse Normandie et dans le Wessex. Certes, les élites s'enfermaient dans des enceintes fossoyées, mais l'habitat était en général constitué de fermes isolées, sans système de défense et ne témoignant pas d'une grande insécurité, contrairement à ce qui a été le cas durant d'autres périodes de l'âge du Bronze. En revanche, ces élites puissantes exerçaient vraisemblablement une coercition sur la population, dont elles se protégeaient sans doute en s'enfermant dans ces grandes enceintes fossoyées. La multiplication des tombes et leur répartition suggèrent un essor démographique, et cela, avec d'autres indices archéologiques, laisse penser que prospérait une société très hiérarchisée, mais en paix. ■

**Propos recueillis par François Savatier**

## BIBLIOGRAPHIE


C. Nicolas *et al.*, **La carte et le territoire : la dalle gravée du Bronze ancien de Saint-Bélec (Leuhan, Finistère),** *Bulletin de la Société préhistorique française,* vol. 118(1), pp. 99-146, 2021.

**La plus ancienne carte d'Europe ?,** *Actualités de l'Inrap,* 6 avril 2021 : https://www.inrap.fr/la-plus-ancienne-carte-d-europe-15574

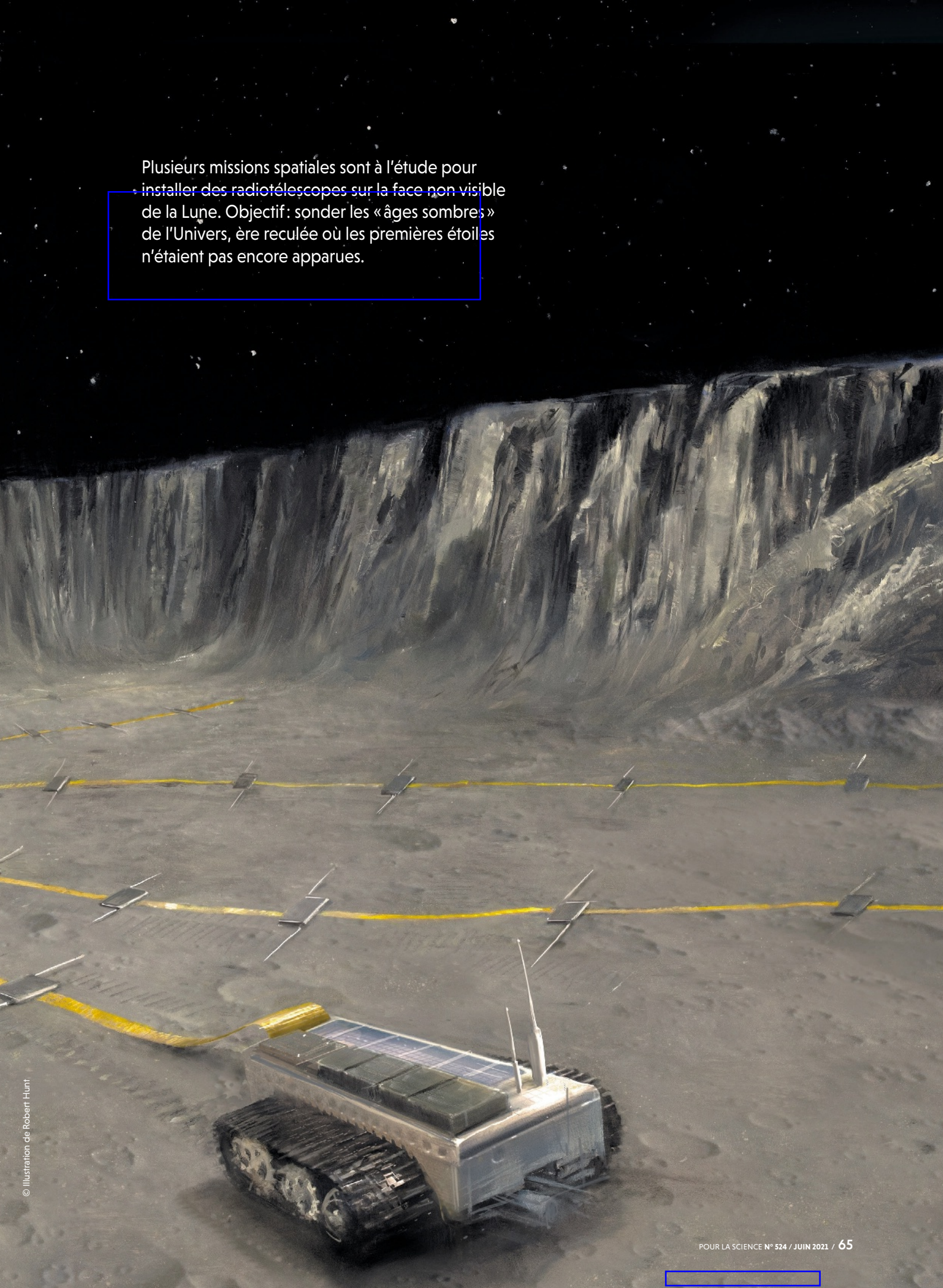
# Des radiotélescopes sur la face cachée de la Lune

Anil Ananthaswamy



Si l'on installait sur la face cachée de la Lune un radiotélescope constitué d'un réseau de plusieurs antennes radio, comme sur cette vue d'artiste, les astronomes disposeraient d'un instrument de choix pour détecter les signaux radio provenant des nuages d'hydrogène qui remplissaient le cosmos à l'époque des « âges sombres », où l'obscurité régnait.

Plusieurs missions spatiales sont à l'étude pour installer des radiotélescopes sur la face non visible de la Lune. Objectif : sonder les « âges sombres » de l'Univers, ère reculée où les premières étoiles n'étaient pas encore apparues.



© Illustration de Robert Hunt

## L'ESSENTIEL

> La face cachée de la Lune est un lieu idéal pour y faire des observations radioastronomiques, étant donné l'absence d'atmosphère et d'émissions radio dues à l'activité humaine.

> Ces observations radioastronomiques permettront notamment d'étudier le cosmos tel qu'il était avant que naissent les premières étoiles.

> Une mission chinoise et plusieurs autres projets ont pour objectif de déployer des antennes radio sur la face cachée de la Lune ou en orbite autour de notre satellite.

## L'AUTEUR



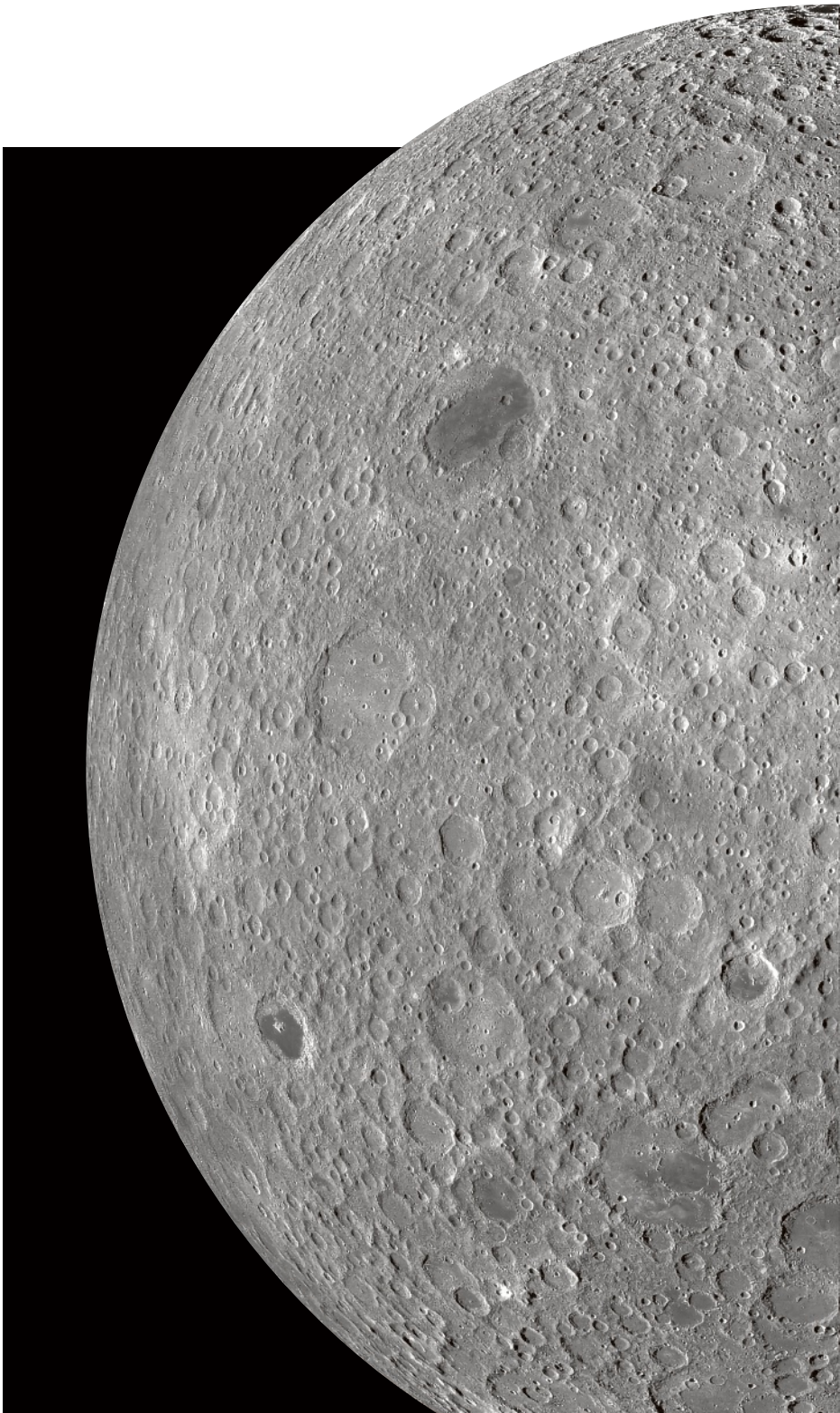
**ANIL ANANTHASWAMY**
journaliste scientifique et écrivain, auteur notamment de *Through Two Doors at Once* (Dutton, 2018)

La face cachée de la Lune est bien différente de celle, à peu près lisse, que nous apercevons la nuit. En 1959, la sonde spatiale soviétique *Luna 3* a pris les premières photographies de cette région. Au lieu des «mers» et autres «océans», c'est-à-dire des grandes plaines de la face visible de notre satellite, ces images ont révélé un paysage hérissé de montagnes. Les observations réalisées depuis ont montré que la face cachée de la Lune est aussi criblée de cratères accidentés, dont l'intérieur est constellé d'autres trous d'impact plus petits.

Bientôt, ce terrain irrégulier devrait être encore plus étrange: il sera semé de radiotélescopes, que déploieront des robots et orbiteurs lunaires de nouvelle génération. Plusieurs agences spatiales planifient en effet des missions destinées à acheminer sur la Lune des détecteurs d'ondes radio. Certaines d'entre elles devraient se dérouler dans les trois ans à venir.

Pour quoi faire? Les astronomes voudraient faire de la face cachée de la Lune un observatoire des «âges sombres» du cosmos. Expliquons de quoi il s'agit. Dans l'Univers observable, plus les objets sont lointains, plus leur lumière a mis de temps à nous parvenir. Donc plus leur distance augmente, plus nous les percevons aujourd'hui dans un état ancien, voire primordial. Ainsi, plus les objets sont distants, plus ils sont proches, temporellement, du Big Bang – la naissance d'un cosmos extrêmement chaud et dense suivie par son expansion rapide.

Quelque 380000 ans après le Big Bang, la température est passée au-dessous de 3000 degrés, puis a continué à décroître; par conséquent, à partir du plasma chaud de particules chargées dont était rempli l'Univers, des atomes neutres d'hydrogène (un proton et un électron liés) se sont formés. L'Univers est alors devenu subitement transparent et les



photons piégés dans le plasma ont pu s'échapper, ce qui a produit un flash intense de rayonnement dont le « fond diffus cosmologique » observé aujourd'hui constitue le vestige. Après ce flash, le cosmos est devenu obscur : c'était le début des « âges sombres » de l'Univers.

## DE GIGANTESQUES NUAGES FROIDS D'HYDROGÈNE

On nomme ainsi les centaines de millions d'années durant lesquelles seuls de gigantesques nuages d'hydrogène froid, donc n'émettant pas de lumière, emplissaient le cosmos. Cette époque reste largement énigmatique. En effet, les germes des grandes structures cosmiques qui peuplent l'Univers actuel se trouvaient au sein des nuages d'hydrogène des âges sombres, nuages qui, plongés dans l'obscurité, sont restés jusqu'à aujourd'hui impossibles à sonder dans le spectre du rayonnement visible.

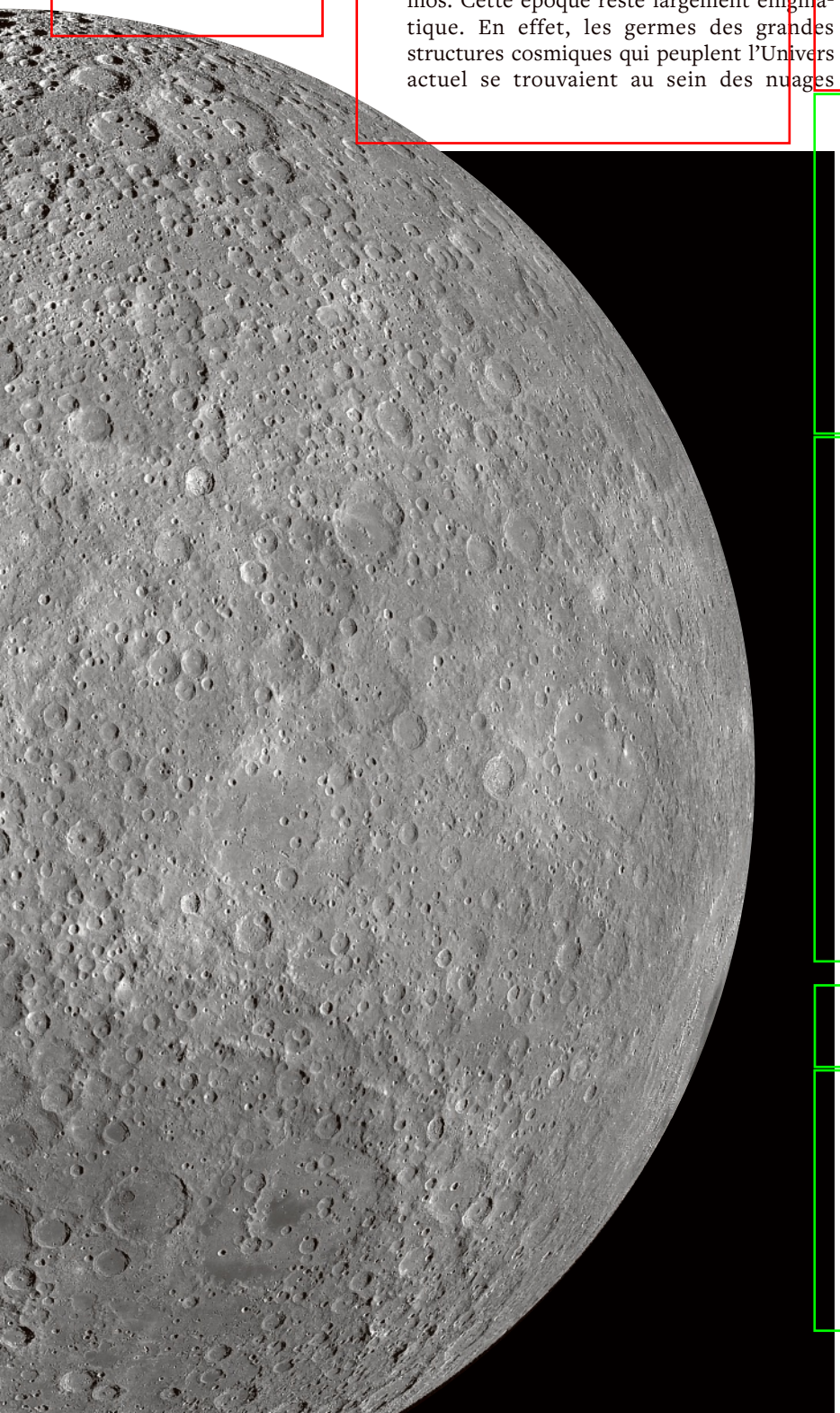
Cependant, les nuages froids d'hydrogène atomique ne sont pas indétectables. Comme on le verra plus loin, ils émettent un rayonnement dans le domaine radio, à une longueur d'onde de 21 centimètres, ou une fréquence de 1420 mégahertz. Cependant, en raison de l'expansion de l'Univers, la longueur d'onde observée est décalée « vers le rouge », c'est-à-dire augmentée, et cela d'autant plus que le nuage d'hydrogène est lointain dans l'espace, donc dans le temps.

Ainsi, la longueur d'onde initiale de 21 centimètres est multipliée par un facteur compris entre 100 et 1000 pour de l'hydrogène froid des âges sombres. En d'autres termes, les signaux issus de cette période devront être détectés avec des radiotélescopes opérant dans le domaine des longueurs d'onde comprises entre 20 et 200 mètres (ou des fréquences comprises entre 1,4 et 14 mégahertz). Or cela n'est pas possible depuis la Terre, car l'ionosphère gêne trop la propagation de ces ondes, sans compter les perturbations dues aux émissions radio des activités humaines.

C'est pourquoi les astronomes rêvent depuis longtemps d'étudier les âges sombres du cosmos depuis la face cachée de la Lune. Leurs instruments s'y trouveraient à l'abri des émissions terrestres et l'atmosphère presque inexistante de notre satellite naturel ne gênerait pas les observations. « Il faudra faire des observations astronomiques avec des antennes radio décamétriques ou hectométriques depuis un site le mieux abrité des interférences terrestres : la face cachée de la Lune », explique ainsi Bernard Foing, astrophysicien à l'Agence spatiale européenne et directeur du Groupe de travail international sur l'exploration lunaire (International lunar exploration working group ou ILEWG), un forum public parrainé par les agences spatiales du monde entier visant à soutenir la coopération internationale en vue de l'exploration et de l'utilisation de la Lune.

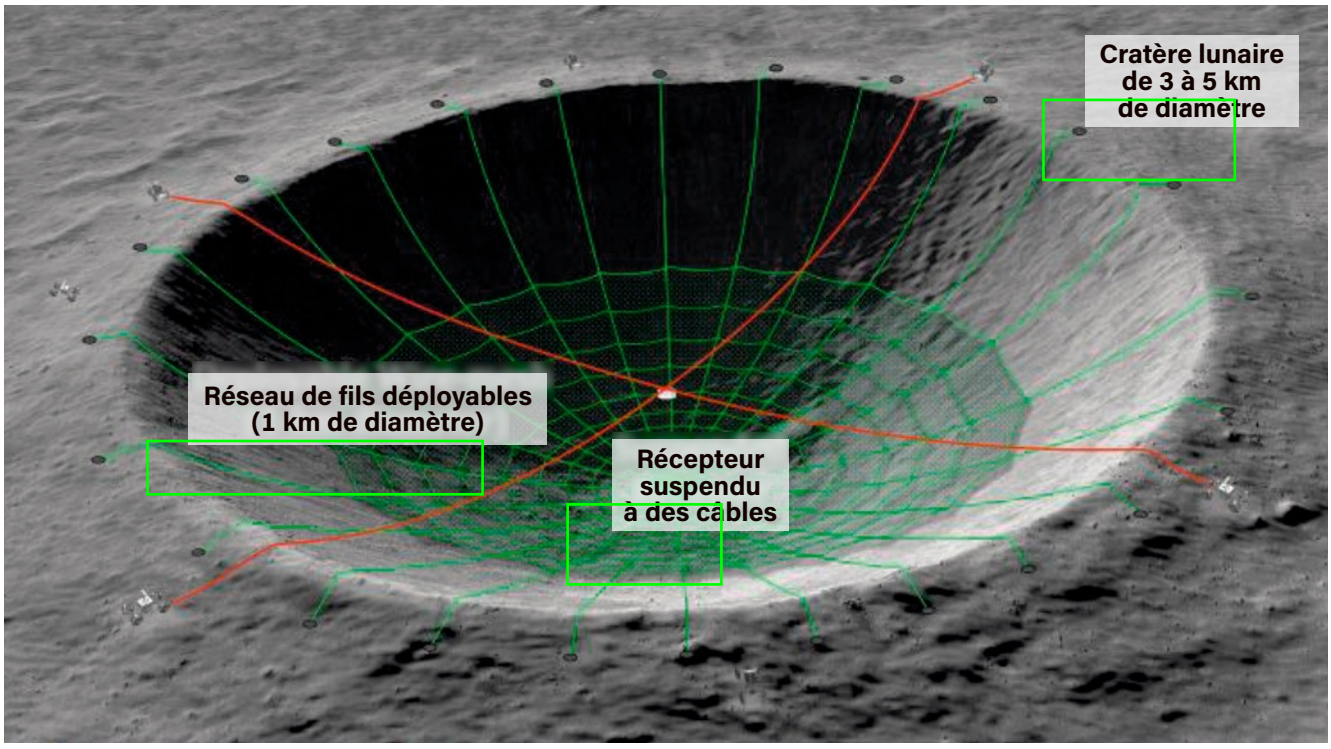
## ÉTUDIER LA RAIE D'ÉMISSION À 21 CENTIMÈTRES DE L'HYDROGÈNE

L'idée que des radiotélescopes puissent détecter la présence d'hydrogène neutre dans l'espace remonte aux années 1940, lorsque le futur astronome néerlandais Hendrik Christoffel van de Hulst (il était alors encore étudiant) a prédit l'existence de la « raie d'émission » à 21 centimètres de longueur d'onde. À basse température, un atome d'hydrogène peut en effet, avec une faible probabilité, absorber et réémettre spontanément un



La Lune tourne sur elle-même de façon synchrone avec la Terre, et nous présente toujours la même face. Sa face cachée, visualisée ici, a un relief plus irrégulier que celui de la face visible.

© Nasa/Goddard/Arizona State University.




Le *LCRT (Lunar Crater Radio Telescope)* est une proposition du Niac (Nasa Institute for Advanced Concepts) visant à assembler, à l'intérieur d'un cratère de la face cachée de la Lune, un radiotélescope opérant à très grande longueur d'onde (de l'ordre de 10 mètres). Si ce projet devait un jour être mené à bien, ce radiotélescope serait le plus grand jamais construit.

photon correspondant à une onde de fréquence 1420 mégahertz (21 centimètres de longueur d'onde). Le phénomène se produit lorsque l'atome passe de son état fondamental (l'état de plus basse énergie) à un certain état excité dit « hyperfin », où le spin (moment cinétique intrinsèque) de l'électron est orienté dans le même sens que le spin du proton, alors qu'il a l'orientation opposée dans l'état fondamental.

La raie d'émission à 21 centimètres est le signal dû aux émissions d'un grand nombre d'atomes d'hydrogène. Ce signal est détectable pour de grands nuages d'hydrogène, d'échelle astronomique.

Un tel signal est censé être apparu quelque 380000 ans après le Big Bang avec la formation des atomes d'hydrogène. En plus de fournir la matière première à partir de laquelle se sont formés les autres atomes, et donc toutes les formes de matière, la recombinaison entre électrons et protons a rendu l'Univers transparent, comme on l'a déjà évoqué. Libéré, le rayonnement fossile produit par le Big Bang put dès lors traverser le cosmos et former le fond diffus cosmologique détecté aujourd'hui. Après cet événement, l'hydrogène neutre s'est répandu dans l'Univers sombre pendant les premières centaines de millions d'années, jusqu'à ce que se produise l'aube cosmique, c'est-à-dire l'apparition des premières étoiles et galaxies – et de la lumière émise par ces objets.

« Un aspect très intéressant de l'hydrogène neutre primordial est qu'il ne donne pas seulement une image instantanée de l'Univers comme le fait le fond diffus cosmologique », explique Kristian Zarb Adami, de l'université d'Oxford. En étudiant avec des radiotélescopes les fluctuations de la raie à 21 centimètres au cours du temps cosmique, on peut retracer l'évolution de l'Univers primitif, lorsqu'il est passé des âges sombres à l'aube cosmique et même au-delà. Après l'aube cosmique est venue l'époque de la réionisation, pendant laquelle le rayonnement des premières étoiles massives et d'autres phénomènes astrophysiques violents ont suffisamment chauffé l'hydrogène neutre restant pour l'ioniser et le retransformer en plasma. C'est à cette époque que les signaux correspondant à la raie à 21 centimètres se sont éteints.

**La Lune est un terrain de jeu où l'on peut tester les théories cosmologiques**

© Nasa

Les cosmologistes s'intéressent particulièrement aux âges sombres parce qu'ils donnent un aperçu de l'Univers quand il était relativement vierge, c'est-à-dire encore dénué des nombreux effets astrophysiques de grande échelle qui troublent son observation (supernovæ, jets cosmiques, etc.).

Pendant cette période, la distribution de l'hydrogène neutre portait encore l'empreinte des fluctuations quantiques primordiales, qui avaient été profondément amplifiées par l'expansion rapide de l'espace-temps au cours des premières fractions de seconde de l'Univers, sans que l'émergence des étoiles, des galaxies et des amas de galaxies ne vienne les perturber. Il est possible que la raie à 21 centimètres issue des âges sombres porte les indices d'une « nouvelle physique », c'est-à-dire de phénomènes non compatibles par les théories actuelles. « C'est un terrain de jeu où l'on peut tester les théories cosmologiques », résume Jack Burns, astrophysicien à l'université de Boulder dans le Colorado. « Si je devais imaginer un endroit idéal pour faire de la radioastronomie décamétrique, j'inventerais la Lune, assène-t-il, et le moment d'y installer des télescopes arrive enfin. »

## L'ASTRONOMIE LUNAIRE DÉMARRE

Les premiers radiotélescopes qui seront placés sur la face cachée de la Lune ou en orbite autour de notre satellite auront un objectif simple : recueillir de premières informations sur les âges sombres. Au fur et à mesure que seront mis en service des instruments plus avancés, les signaux issus de la raie à 21 centimètres apparaîtront avec plus de détails, ce qui permettra aux astronomes de dresser des cartes dynamiques et en haute résolution des nuages primordiaux d'hydrogène.

Certains instruments sont déjà en service. Ils font partie de l'alunisseur chinois *Chang'e 4* parvenu sur la face cachée de la Lune en janvier 2019 et de l'orbiteur lunaire *Queqiao* (son nom fait allusion au « pont construit dans le ciel par les pies » de la légende chinoise) lancé en mai 2018 pour relayer le signal de l'alunisseur vers la Terre. « L'arrivée de *Chang'e 4* a été le premier alunissage en douceur sur la face cachée de la Lune, souligne Bernard Foing. Un grand succès. »

Tant *Chang'e 4* que *Queqiao* sont équipés d'antennes radio. Construites en collaboration avec une équipe néerlandaise, celles de *Queqiao* ne se sont malheureusement pas déployées complètement, tandis que le signal de l'unique antenne de *Chang'e 4* est altéré par des interférences avec les ondes radio émises par l'électronique de l'alunisseur. Afin d'éviter cette difficulté, on pourra doter d'un blindage supplémentaire les futurs engins lunaires destinés à l'exploration des âges sombres. Il se pourrait aussi que ces engins déploient de multiples antennes sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres de sol lunaire.

La prochaine phase préparatoire de l'astronomie sur la face cachée de la Lune est en effet sur le point de commencer, avec l'installation sur la Lune, en octobre 2021, du spectromètre de basse fréquence Rolses, acronyme signifiant « Observations à la surface lunaire de la gaine de photoélectrons » (Radiowave observations at the lunar surface of the photoelectron sheath).

Rolses sera embarqué à bord d'un alunisseur privé agréé par la Nasa dans le cadre du programme CLPS (Commercial lunar payload services), un programme de l'agence spatiale américaine visant à sous-traiter le transport d'instruments scientifiques sur la Lune. Même s'il sera installé à l'ouest de la face visible de la Lune, dans la région de l'Océan des tempêtes (oceanus Procellarum), ses mesures des ondes de basses fréquences (dont des ondes radio) naturellement produites par le sol lunaire joueront un rôle crucial dans les futurs travaux, sur la face cachée, d'identification des signaux radio émis par le sol. « Enfin du concret, se réjouit Jack Burns, qui fait partie de l'équipe Rolses. Trente-cinq ans que j'y travaille, et le projet est en train de se réaliser. »

Un autre instrument visant à caractériser les interférences radio sur la Lune devrait être lancé dès 2024 : Lusee (Lunar surface electromagnetics experiment). « Lusee sera installé dans le cratère d'impact de Schrödinger sur la face cachée de la Lune », précise Jack Burns. L'alunisseur acheminant Lusee devrait aussi emporter l'instrument Dapper (Dark ages polarimeter pathfinder, « explorateur à polarimètre des âges sombres »), un radiotélescope opérant à 17-38 mégahertz et destiné à détecter la raie à 21 centimètres en provenance des âges sombres. « Dapper a été initialement conçu pour être mis en orbite autour de la Lune, mais il pourrait être embarqué sur l'alunisseur en question, explique Jack Burns. La Nasa finance notre travail sur la mission de Dapper. Nous serons prêts à temps. »

Que ce soit en orbite ou sur le sol lunaire, Dapper se limitera à un ensemble d'antennes dipolaires placées en un seul lieu. Mais les astronomes ont des plans plus ambitieux. Ils veulent installer sur la Lune des réseaux d'antennes individuelles réparties sur de grandes distances. De tels réseaux équivalent à des instruments de résolution bien supérieure à celle d'une seule antenne (la résolution est proportionnelle à la distance séparant les antennes), qui seront effectivement capables de localiser des sources radio dans le ciel.

## L'ETNA, UN TERRAIN D'ESSAI

**Une équipe de robots construits par le Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique va déployer sur les flancs du volcan sicilien un radiotélescope constitué d'un réseau d'antennes radio localisées avec une grande précision.**

Les flancs de l'Etna abondent de chaos rocheux et de champs d'éjectas vitreux. C'est sur ce terrain tourmenté par les impacts, comparable à celui de la face cachée de la Lune, que plusieurs équipes du DLR, le Centre allemand d'aéronautique et d'astronautique (Deutsches Zentrum für Luft– und Raumfahrt) – l'équivalent allemand du Cnes français (le Centre national d'études spatiales) – vont s'entraîner en juin 2021 à déployer à distance un radiotélescope.

Pour ce faire, les ingénieurs du projet, dirigés par Armin Wedler, de l'Institut de robotique et de mécatronique du DLR, préparent une campagne de télérobotique coopérative mettant en œuvre un atterrisseur, deux rovers intelligents et un rover de l'Agence spatiale européenne téléopéré par un astronaute. Au cours de l'expérience dénommée Arches Lofar (acronymes de Autonomous Robotic Networks to Help Modern Societies et Low Frequency Array), dont Bernard Foing est le conseiller scientifique, ils vont tester le déploiement sur le terrain et en grandeur réelle d'un réseau de petites antennes simulant un radiotélescope interférentiel installé sur la face cachée de la Lune. Pendant la campagne d'essai, une équipe de robots déploiera au moins sept modules, dont quatre antennes non câblées, dans le but de construire un réseau d'antennes connu avec une bonne précision géométrique.

L'expérience comprend plusieurs étapes. La première consiste à déterminer la taille souhaitée du réseau et son emplacement sur le terrain. La deuxième consiste à faire installer par un robot un premier boîtier à antenne ; cette opération s'effectuera après avoir déterminé sur la carte du terrain une zone optimale (et une zone suboptimale à utiliser éventuellement) en fonction d'une modélisation de la topographie, de la couverture des communications radio et de la précision souhaitée pour le radiotélescope interférentiel. Dans le cas de la Lune, le terrain n'aura pu être exploré en détail, car seules des images prises par l'orbiteur avec une précision de l'ordre du mètre seront disponibles. La zone de placement devra donc être recartographiée à la demande afin de déterminer la possibilité de la faire traverser par un rover. Un drone – sur la Lune, dépourvue d'atmosphère, il sera à réaction – pourrait accomplir cette tâche. Pour la faciliter, un imageur à petit champ, mais à haute résolution, aura cartographié le terrain.

Dans la troisième étape, une fois toutes les zones de déploiement explorées, un rover récupère successivement sur l'atterrisseur chacun des boîtiers à antenne (modulaires) et les place sur le terrain.

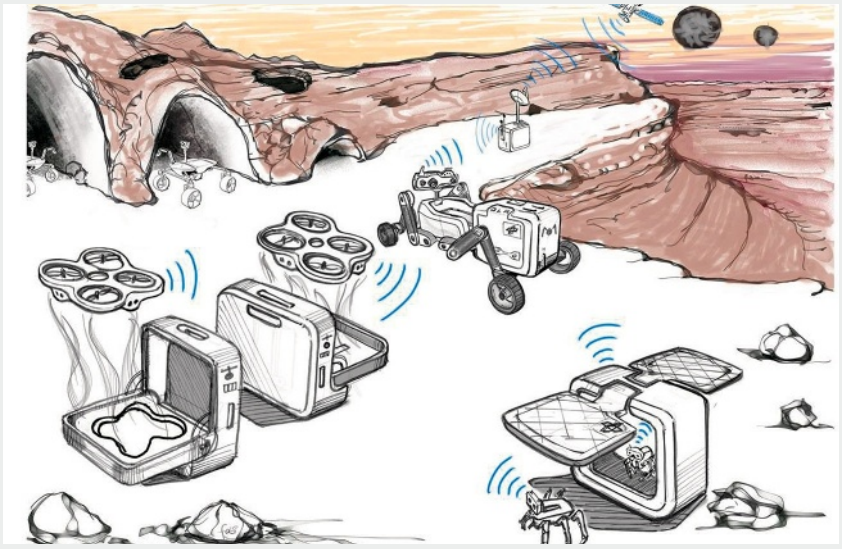
Ensuite, un second rover utilise son système de navigation visuelle pour localiser trois boîtiers supplémentaires par rapport à l'atterrisseur, qui serviront à déterminer la géométrie du réseau d'antennes par rapport à l'atterrisseur et à construire un système de coordonnées.

> La zone de placement devra être recartographiée à la demande

Dans une cinquième étape, tous les robots quittent la zone du réseau et le système de synchronisation radio est activé afin de déterminer la géométrie du réseau au décimètre près, grâce à la mesure de temps de vol de paquets d'ondes radio.

Une fois le réseau d'antennes positionné et précisément localisé, une antenne dipolaire est déployée pour émettre des signaux radio à la fréquence porteuse de 20 mégahertz. Ces signaux sont reçus, échantillonnés et communiqués à l'atterrisseur par le réseau d'antennes à des fins de calibration. Sur la Lune, des sources radio célestes et fixes pourront aussi servir à calibrer le réseau. Sur l'Etna, un émetteur à basse fréquence simulant une source radio de basse fréquence telle que le Soleil sera placé en outre en un endroit choisi afin d'établir que le réseau fonctionne bien.

Les modules comportant les antennes sont prévus d'après ce qui a déjà été développé pour l'atterrisseur franco-allemand *Mascot*, qui s'est posé en 2018 sur l'astéroïde Ryūgū à partir de la sonde japonaise *Hayabusa 2*. Quatre de ces modules sont équipés d'un système de communication disponible dans le commerce pour sauvegarder et transmettre les données, d'un récepteur GNSS (équivalent européen du GPS) pour déterminer leur position au sol, d'un système radio de positionnement et de synchronisation, d'une électronique radio commandée par ordinateur. Trois modules non équipés de ce système radio serviront à transformer le réseau en un système de coordonnées, qui sera utilisé en plus de la navigation visuelle des rovers – souvent imprécise – afin de bien maîtriser la géométrie du réseau. En principe, la précision atteinte dans le positionnement des antennes du radiotélescope devrait être de l'ordre du dixième de la longueur d'onde des ondes radio utilisées.



**Des robots différents peuvent réaliser ensemble une tâche complexe sur la face cachée de la Lune, par exemple déployer un radiotélescope. Dans le cadre du projet Arches Lofar, la DLR (le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique) s'apprête à tester une telle équipe hétérogène de robots sur les flancs du mont Etna.**

**FRANÇOIS SAVATIER**
Pour la Science

© Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt

Xuelei Chen, des Observatoires astronomiques nationaux de l'Académie chinoise des sciences, pense qu'à court terme, l'orbite lunaire constitue le meilleur site pour y installer des réseaux lunaires de cartographie des âges sombres. Les antennes d'un certain nombre de satellites pourraient être configurées en un réseau qui effectuerait ses observations aux moments où les satellites se trouvent tous devant la face cachée.

## METTRE EN ORBITE LUNAIRE DES ANTENNES RADIO…

« Le coût d'une telle expérience serait modéré, et nous pouvons la réaliser avec la technologie actuelle », argumente Xuelei Chen. Le projet esquissé à ce stade prévoit un réseau formé à l'aide de cinq à huit satellites. L'un des satellites serait le vaisseau principal, qui hébergerait la plupart des composants électroniques servant à recevoir et à combiner les signaux des autres satellites, puis à relayer les résultats vers la Terre. « Nous prévoyons de lancer les satellites tous ensemble, puis de les libérer un à un », explique Xuelei Chen.

L'installation d'un tel réseau à la surface de la face cachée de la Lune sera beaucoup plus difficile pour de nombreuses raisons. En particulier parce que le terrain y est accidenté et parce que le froid qui règne pendant les quatorze jours de la nuit lunaire est une menace pour les engins spatiaux.

Pour commencer à se préparer à ce type de mission, l'équipe de Bernard Foing prévoit de tester le déploiement d'antennes radio à l'aide de rovers robotisés conçus par le Centre aérospatial allemand. Un premier essai aura lieu en juin 2021 sur l'Etna, en Sicile, dont le sol couvert d'éjectas volcaniques simulera la surface lunaire (*voir l'encadré page ci-contre*). Les ingénieurs contrôleront à distance les rovers, qui transporteront chacun quatre boîtes d'antennes. « Nous les positionnerons dans différentes configurations pour valider la détection de sources radio, et préparer ce que nous pourrons faire à l'avenir sur la Lune », explique Bernard Foing.

## … OU LES LAISSER TOMBER SUR LE SOL LUNAIRE !

Une autre stratégie pour installer un réseau de détecteurs radio sur la face cachée de la Lune consisterait à laisser des antennes tomber d'un orbiteur afin qu'elles se posent où bon leur semble, puis se déploient. Kristian Zarb Adami et ses collègues travaillent à Oxford sur l'une de ces idées : un interféromètre à basse fréquence, conçu pour mesurer précisément les caractéristiques d'une émission radio, fait de 128 « ministations » à 8 bras, chacun combinant 16 antennes spirales. « Mon idée est que ces antennes soient lâchées depuis le satellite afin qu'elles atterrissent toutes en divers endroits sur la surface lunaire », résume-t-il.

Pour minimiser le nombre de pièces mobiles, l'équipe a trouvé le moyen d'imprimer ces antennes sous forme de feuilles plates qui prendront leur forme définitive une fois déroulées sur le sol lunaire. « Nous avons testé cette technologie ces cinq dernières années : il s'avère que l'on peut imprimer des antennes aussi vite que l'on imprime des journaux. Nous sommes en train de réaliser un prototype de ces antennes spirales. La prochaine étape, ajoute Kristian Zarb Adami, consistera à concevoir une ministation et à la larguer depuis un drone dans une région reculée afin de voir si elle se déploie. Nous pourrions par exemple le faire dans une zone aride de l'ouest de l'Australie. »

**Les rovers déploieraient les antennes en les répartissant en quatre pétales dans une région faisant 10 kilomètres de diamètre**

Parallèlement, Jack Burns dirige aussi une étude de principe financée par la Nasa visant la construction d'un radiotélescope lunaire nommé Farside. Cet acronyme de Farside array for radio science investigations of the dark Ages and exoplanets, « Réseau radiométrique de la face cachée de la Lune pour l'étude des âges sombres et des exoplanètes », signifie aussi « face cachée ». Pour concevoir Farside, Jack Burns et Gregg Hallinan, cochercheurs principaux à l'Institut de technologie de Californie, ont fait équipe avec le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa. Ces scientifiques cherchent à faire atterrir, à l'aide d'alunisseurs financés par la Nasa, une charge utile de 1,5 tonne constituée de quatre rovers et de 256 antennes. Les rovers déploieraient les antennes en les répartissant en quatre pétales dans une région de 10 kilomètres de diamètre. « Nous pouvons le faire avec les techniques actuelles, avance Jack Burns, et mener à bien ce projet vers la fin de la décennie semble très plausible. » ■

### BIBLIOGRAPHIE


A. Wedler *et al.*, **German Aerospace Center's advanced robotic technology for future lunar scientific missions,** *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 379, article 20190574, 2021.

M. Lemonick, **La fin de l'âge sombre,** *Pour la Science*, n° 441, pp. 38-45, juillet 2014.

A. Loeb, **L'Univers à l'âge des ténèbres,** *Pour la Science*, n° 351, pp. 38-44, janvier 2007.

## L'ESSENTIEL

> *La grana fina* ou cochenille fine est un insecte parasite d'un cactus (nopal) des hautes terres mexicaines.

> Dès le XVIe siècle, les Espagnols ont contrôlé l'exploitation et l'exportation de ce produit, dont la grande valeur résultait d'un exceptionnel pouvoir tinctorial pour les rouges de luxe.

> En 1777, au terme d'un périlleux voyage, le naturaliste français Nicolas-Joseph Thiéry de Menonville parvint à déjouer la surveillance espagnole. Il s'empara de l'insecte et du nopal pour en tenter l'acclimatation à Saint-Domingue.

## LES AUTEURS



**DANIELLE TRICHAUD-BUTI**
agrégée d'histoire et spécialiste d'histoire économique et sociale de l'Europe méditerranéenne (XVIe-XIXe siècle)



**GILBERT BUTI**
professeur émérite d'histoire à Aix-Marseille Université et chercheur à la maison méditerranéenne des sciences de l'homme (laboratoire Telemme, CNRS, Aix-Marseille Université), à Aix-en-Provence, spécialiste d'histoire économique et sociale de l'Europe méditerranéenne (XVIe-XIXe siècle)

# Le rapt de la cochenille mexicaine

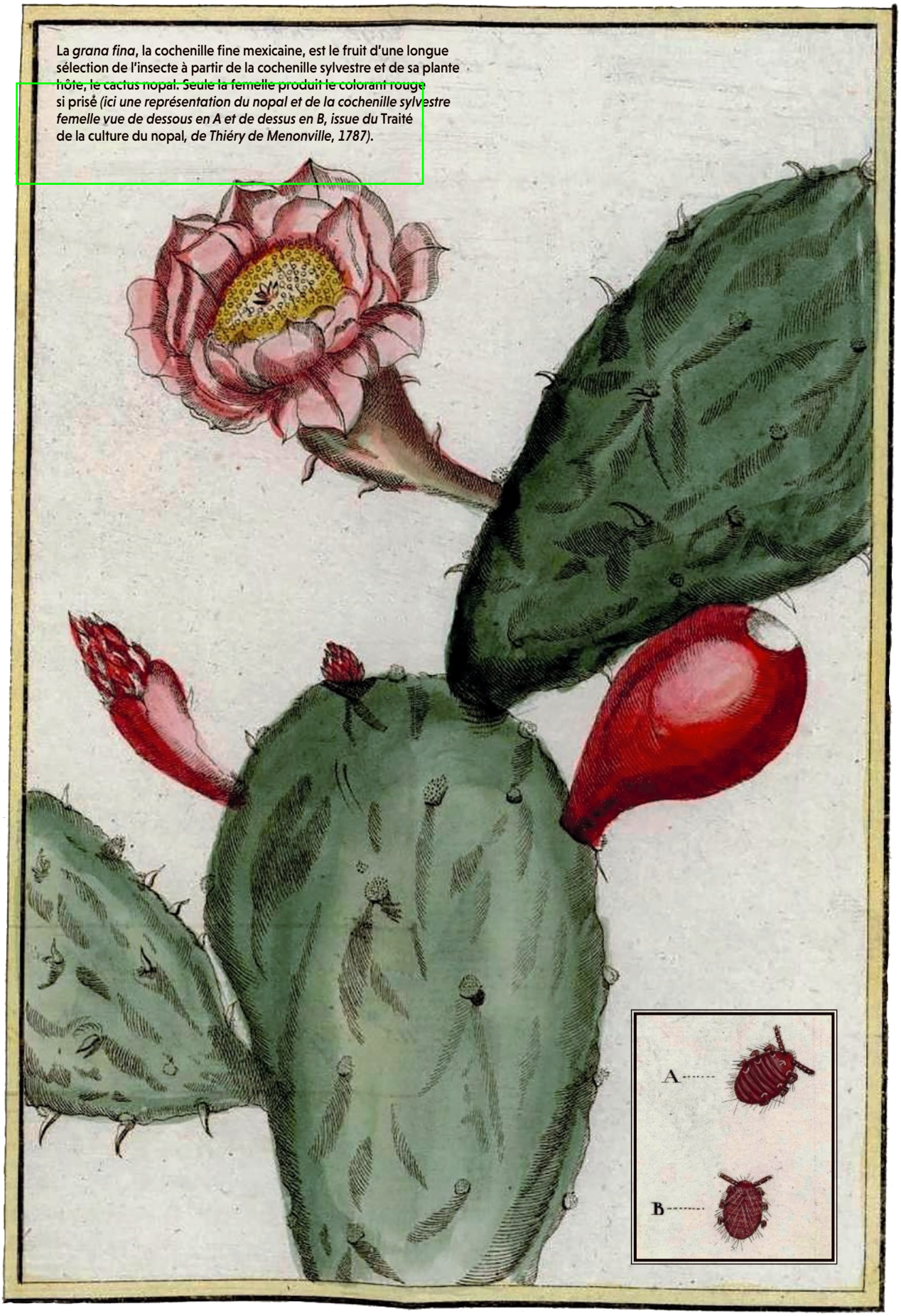
Au XVIIIe siècle, un mystérieux petit insecte élevé au Mexique faisait fureur sur les marchés asiatiques et européens. Il attira les convoitises de nombreux aventuriers, dont un jeune naturaliste lorrain…

Cochenille. Aujourd'hui, en lisant ce mot, on pense en général au colorant rouge de certains aliments et cosmétiques, ou encore à un parasite des arbres fruitiers, contre lequel jardineries et drogueries proposent toute une gamme d'insecticides. Pourtant, au XVIIIe siècle, «recueillir de la cochenille, c'est recueillir de l'or».

Cette affirmation du naturaliste français Nicolas-Joseph Thiéry de Menonville n'est pas excessive. Parmi les fabuleuses cargaisons du Nouveau Monde figuraient non seulement métaux précieux (l'or et en particulier l'argent), cacao, sucre, cuirs, café, bois de campêche et indigo, mais aussi la cochenille. Au vrai, la cochenille mexicaine ou *grana* était alors une matière première tinctoriale rare et chère, destinée aux rouges de luxe. Dans l'échelle des valeurs des marchandises acheminées par les flottes et galions espagnols, elle se situait, jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, juste après les métaux précieux. Aussi les Espagnols en ont-ils immédiatement verrouillé son marché: production limitée essentiellement à une province mexicaine, exportation par deux ports américains, débarquement contrôlé à Séville, puis Cadix, où s'approvisionnaient des négociants européens qui la redistribuaient sur les grandes places marchandes et manufacturières.

Pour conserver ce monopole et afin d'en contrôler le marché, les Espagnols ont

La *grana fina*, la cochenille fine mexicaine, est le fruit d'une longue sélection de l'insecte à partir de la cochenille sylvestre et de sa plante hôte, le cactus nopal. Seule la femelle produit le colorant rouge si prisé *(ici une représentation du nopal et de la cochenille sylvestre femelle vue de dessous en A et de dessus en B, issue du* Traité de la culture du nopal*, de Thiéry de Menonville, 1787)*.




© Avec l'aimable autorisation de la John Carter Brown Library

entretenu, à toutes ces étapes, le secret sur la nature de la *grana*, que d'aucuns ont naturellement essayé de percer. Le mystère entretenu autour de la cochenille a sans doute contribué à notre intérêt pour son passé. Nous avons rencontré cet étonnant produit en licence d'histoire, lors d'un devoir sur les achats de négociants marseillais au XVIIIe siècle. Et l'envie de partir sur ses traces ne nous a plus quittés. Au fil des années, et malgré de nombreuses pauses liées à notre métier d'enseignant, traquer la cochenille nous a amenés à fréquenter des dépôts d'archives, à ouvrir des liasses de correspondances, à parcourir des livres de comptes, à lire de multiples publications d'horizons scientifiques variés, et même à explorer les hauts plateaux mexicains à la recherche de la matière première abandonnée, sinon pour des usages désormais essentiellement agroalimentaires.

Finalement, en suivant le cadavre d'un petit insecte oublié, nous avons découvert une vaste histoire qui en croise de nombreuses autres, comme celles de la première mondialisation des échanges, de la circulation des savoir-faire ou des transferts culturels, linguistiques et techniques. Parmi les multiples péripéties de cette épopée, l'aventure de Thiéry de Menonville est particulièrement emblématique des efforts déployés dans le monde pour s'emparer du précieux insecte et du savoir-faire associé.




**Au XVIIIe siècle, les Indiens récoltaient la cochenille sur le nopal à l'aide d'un couteau émoussé, d'un bambou taillé en biseau ou d'une queue d'écureuil ou de cerf, comme sur cette illustration d'un traité que le scientifique mexicain José Antonio de Alzate y Ramírez a consacré à la cochenille et au nopal en 1777.**

## GRAINE OU INSECTE ?

On a souvent assimilé la cochenille à une graine dans la mesure où elle se présente, après traitement, sous la forme de grains desséchés, noirs ou rougeâtres. L'appellation espagnole de *grana* renforçait la confusion. Ainsi, en 1552, le voyageur Francisco López de Gómara présentait la *grana* comme une graine, tandis que quelques décennies plus tard, le missionnaire jésuite José de Acosta la décrivait comme un insecte.

En Europe, plusieurs controverses scientifiques relatives à sa nature ont scandé les XVIe et XVIIe siècles. Et au début du XVIIIe siècle encore, Jacques Savary des Bruslons affirmait, dans son monumental *Dictionnaire universel du commerce*, « qu'il y a une cochenille qui est un ver et une cochenille qui est une graine. » L'incertitude demeurait, entretenue par les Espagnols. Le doute fut finalement levé en 1729 à la suite d'un pari entre deux scientifiques.

Au terme d'une confrontation arbitrée par des magistrats, la thèse du naturaliste hollandais Melchior de Ruysscher en faveur de la nature animale a été validée. Cette surprenante controverse se situait au croisement des études naturalistes et de la jurisprudence. L'entomologiste René-Antoine Ferchault de Réaumur, qui avait suivi le débat, ne dissimula pas son étonnement : « C'est peut-être la première fois qu'une question d'histoire naturelle a été traitée et décidée juridiquement. » Il enregistra solennellement le résultat et le naturaliste suédois Carl von Linné classa la cochenille mexicaine, *Coccus cacti* (aujourd'hui *Dactylopius coccus*), dans la famille des Coccidés, dans l'ordre des hémiptères, la femelle seule donnant le colorant (acide carminique).

Les cochenilles n'étaient pourtant pas inconnues en Europe. Aujourd'hui, les entomologistes en répertorient plus de trois cents espèces rien qu'en France. Les plus abondantes ne présentent aucun intérêt économique. D'autres, plus rares, ont été recherchées et utilisées, car elles fournissaient un colorant rouge dont on connaît la force symbolique : c'est le sang, la vie, la révolte, le luxe, le pouvoir.

Dans la Rome impériale, le rouge que l'on fabriquait avec le murex, coquillage prélevé en Méditerranée, était réservé à l'empereur, aux sénateurs et aux chefs de guerre. Mais au Moyen Âge, la recette de la pourpre romaine s'était perdue en même temps que s'était épuisée la ressource. Certaines racines et des cochenilles avaient pris le relais chez les

© Archive.org ; avec l'aimable autorisation de la Newberry Library

teinturiers de Venise, d'Anvers ou de Nuremberg. Ainsi en était-il de la cochenille de Pologne, de celle d'Arménie et de la « graine écarlate ou de vermeil » que l'on trouve sur les chênes-kermès des collines méditerranéennes et qui fournissait le vermillon recherché par les artisans de Provence, d'Italie, d'Espagne, de Flandre et d'Afrique du Nord.

**Le pouvoir tinctorial de l'insecte résultait d'un long processus de sélection à l'époque précolombienne**

Toutefois, peu après la découverte de l'Amérique, la mystérieuse *grana fina* – la cochenille fine – mexicaine a relégué ces cochenilles européennes au second rang. Son fort potentiel tinctorial résultait d'un long processus de sélection de l'insecte à rouge et de sa plante-hôte par les Zapotèques et les Mixtèques, deux peuples de l'Amérique précolombienne. Elle s'y différenciait ainsi de la sauvage, dite « sylvestre », moins riche en acide carminique. Cette patiente domestication, oubliée dans l'histoire, n'est pas sans rappeler celle du ver à soie et de l'abeille.

La *grana fina* était exploitée essentiellement en Amérique centrale sur les hautes terres de la région d'Oaxaca, entre 1500 et 2000 mètres d'altitude. Les Aztèques l'utilisaient pour peindre des armes, teindre des étoffes et décorer des parois de temples, l'exigeant comme tribut auprès des peuples soumis. Les premières descriptions de son élevage datent de la conquête espagnole. La *grana* parasite le nopal ou *Opuntia ficus indica*, un cactus mexicain à raquettes épaisses et épineuses, sur lesquelles se fixent les cochenilles femelles. C'est ce cactus qui figure aujourd'hui au centre du drapeau mexicain.

La *grana*, dite aussi *misteca*, se différencie des cochenilles européennes par son haut pouvoir tinctorial ainsi que par la pérennité et la solidité de la couleur – ou plus exactement des couleurs, car la gamme des nuances obtenues est très large : elle va du jaune d'or au violet le plus sombre en passant par l'écarlate, le carmin et le cramoisi, nuances que l'on retrouve dans des ballots de draps de laine.

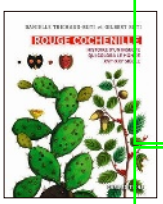
Ces qualités exceptionnelles justifiaient le prix élevé d'un produit qui, peu volumineux, passait parfois inaperçu aux yeux des conquistadors, mais non des corsaires ou pirates. Ainsi, au cours de l'été 1597, le comte d'Essex, corsaire au service de la reine d'Angleterre, projeta de s'emparer de la flotte espagnole qui revenait du Mexique. Si sa prise se réduisit à trois navires à cause d'une tempête, l'abordage lui dévoila une cargaison de quelque 25 tonnes de cochenille. D'autres « chiens de mer » au service de la couronne anglaise, tels Francis Drake, John Chilton et John Hawkins, ou « gueux de mer » hollandais, comme Piet Heyn, rapportèrent également en Europe du Nord-Ouest des caisses et surons (sacs de peaux) contenant le produit tant prisé des fabricants d'articles de luxe.

## UN PRODUIT CONVOITÉ

Parallèlement, ne pouvant se servir sur place « sous peine de la vie », mais désireux de rompre leur dépendance vis-à-vis de l'Espagne, les Européens cherchaient d'autres sources d'approvisionnement dans les territoires nouvellement colonisés. Ainsi, après une tentative décevante en Perse, les Anglais se tournèrent vers le Nouveau Monde. En 1578 déjà, alors qu'il préparait son troisième voyage vers l'Amérique du Nord, Martin Frobisher savait qu'il ferait gagner une « chose remarquable » s'il trouvait « la baie de cochenille ». Six ans plus tard, le géographe Richard Hakluyt suggéra que des teinturiers accompagnent systématiquement les colonisateurs « pour chercher la riche *cochinilio* ». Les instructions au Conseil de Virginie (1609) mentionnent la cochenille comme objectif de la fondation de la colonie. L'espoir était encore vif en 1636 quand la Old Providence Island Company demanda au capitaine William Rons d'enquêter pour savoir si la *grana* était cultivable sur l'île de Santa Catalina, en mer des Caraïbes. Mais ces perspectives restèrent sans lendemain.

La surveillance espagnole demeura efficace jusqu'à ce que, à la fin du XVIII^e siècle, Thiéry de Menonville entra en scène. Sur fond d'audace et d'intrépidité, sinon d'inconscience vu les risques encourus, le naturaliste, mû tant par l'intérêt commercial que par la curiosité scientifique, tenta sa chance à son tour.

Très tôt, les colonies espagnoles du Nouveau Monde avaient suscité l'enthousiasme de nombreux savants français. Louis Feuillée, Amédée Frézier, Jean Godin, Pierre Bouguer, Bernard de Jussieu et Charles de La Condamine sont connus pour avoir voyagé en Amérique espagnole au XVIII^e siècle à la demande ou avec le soutien des autorités françaises pour des raisons à la fois politiques et économiques.




**À LIRE**

**Danielle Trichaud-Buti et Gilbert Buti ont récemment publié Rouge cochenille. Histoire d'un insecte qui colora le monde. XVI^e-XXI^e siècle,** CNRS, 2021.





Si la cochenille mâle est ailée et vole, la femelle n'est mobile qu'au stade larvaire. Adulte, elle se fixe sur sa plante hôte – le nopal ou figuier de Barbarie – et n'en bouge plus, suçant la sève du cactus, exsudant une substance farineuse et pondant sur place. C'est elle que l'on récolte pour produire le rouge.

En application d'orientations mercantilistes, le Bureau du commerce – l'institution royale qui traitait les dossiers commerciaux – cherchait à s'affranchir des achats onéreux de matières tinctoriales. Des mémoires furent adressés dans cet objectif à l'Académie royale des Sciences, où Jean Hellot, Pierre-Joseph Macquer et Claude-Louis Berthollet étaient des experts connus pour leurs travaux dédiés aux colorants. Car l'art de la teinture n'était plus un domaine exclusif d'artisans au savoir empirique. Des scientifiques s'y intéressaient pour comprendre le « phénomène chimique des affinités » entre la nature des fibres, les pigments et les mordants (substances ajoutées afin de fixer la teinture), et pour proposer des procédés techniques reposant sur de solides bases scientifiques.

## UN AVOCAT FÉRU DE BOTANIQUE

Né en 1739 en Lorraine, fils d'avocat, Thiéry de Menonville était lui-même devenu avocat au parlement de Lorraine. Toutefois, souhaitant devenir naturaliste, il s'était rendu à Paris pour étudier la botanique au Jardin du roi, où il avait rencontré Jussieu. Par ailleurs, il connaissait la proposition de Réaumur au régent Philippe d'Orléans pour produire de la cochenille dans les colonies françaises. Il avait aussi lu les pages de l'abbé Raynal relatives à cet insecte dans son *Histoire philosophique et politique des établissements et du commerce des Européens dans les deux Indes* (1772) et savait qu'aucune décision n'avait encore été prise à son sujet. Et il n'ignorait pas non plus que la Royal Society de Londres encourageait son acclimatation dans les colonies anglaises pour répondre aux demandes des industries textiles de luxe.

Aussi Thiéry de Menonville adressa-t-il un mémoire au Bureau du commerce en exposant les grandes lignes d'un projet pour y parvenir. Avec les soutiens de membres du Bureau, comme Guillaume Rostagny, qui représentait la puissante Chambre de commerce de Marseille, et Macquer, professeur de chimie au Jardin du roi, ainsi que d'Antoine de Sartine, secrétaire d'État de la Marine, il obtint une aide de 4000 livres. Il avait 38 ans quand, fin 1776, il quitta la France pour Saint-Domingue, où il s'était déjà rendu à son compte en 1774-1775.

Après soixante-six jours de navigation, il y arriva en janvier 1777 et obtint un laissez-passer sous le titre de botaniste et de licencié en médecine. Son séjour fut bref, car un brigantin était en partance pour La Havane, en terre espagnole, où il souhaitait se procurer un passeport pour la Nouvelle-Espagne. Il quitta Port-au-Prince le 21 janvier avec 2000 livres et très peu de bagages. Il y revint huit mois plus tard.

Le récit qu'il a laissé de son voyage est extraordinaire à plus d'un titre. C'est celui d'un botaniste et d'un ethnologue, d'un homme des Lumières qui décrit en latin certaines plantes et animaux, sensible aux conditions météorologiques, aux villes, aux activités et aux paysages. Il se montre attentif aux comportements des habitants, « Espagnols, Indiens et Noirs », à leurs particularités vestimentaires, alimentaires ou culturelles, avec beaucoup de curiosité, d'ironie parfois, de psychologie et de sens moral. Il fait état de ses sentiments lors des diverses rencontres, raconte ses échanges avec des habitants dont il ne connaît pas la langue, relate les dangers qu'il affronte dans une nature hostile, tout en redoutant une administration suspicieuse qui

À gauche : © Shutterstock.com/Ecuadorpostales ; à droite : © Shutterstock.com/Victor Suarez Naranjo





**Les différentes manières de faire périr la cochenille déterminaient leurs couleurs, ce qui pouvait avoir des conséquences sur sa commercialisation. La méthode la plus pratiquée consistait à plonger les insectes dans des chaudrons d'eau bouillante, puis à les exposer au soleil. Par ce procédé, la couche blanchâtre disparaît et les insectes prennent une teinte brun foncé *(ci-dessus à gauche)*. On broie ensuite les insectes et la poudre obtenue est prête à l'emploi *(à droite)*.**

dispose de nombreux postes de douane et déploie des «lanciers pour arrêter les déserteurs et les étrangers».

## EN QUÊTE DE LA COCHENILLE D'OAXACA

Au cours de ce «périple insensé», réalisé dans une phase de paix entre la France et l'Espagne, il bénéficia d'une relative hospitalité de la part des représentants des autorités locales, dont il déjoua la curiosité en répondant habilement aux demandes de soins médicaux. Son objectif, sinon son obsession, était de tout mettre en œuvre pour rapporter de la cochenille vivante d'Oaxaca.

Sa stratégie consistait à «faire le curieux», sans jamais prendre l'initiative de parler de la cochenille. Lors de ses séjours à La Havane (du 3 février au 11 mars 1777) et à Veracruz (du 25 mars au 31 mai), il s'efforça de construire son personnage et d'améliorer un peu son castillan. À Veracruz, il s'installa comme médecin botaniste. Il entendait herboriser aux alentours de la ville, mais l'Audience royale de Mexico lui interdit de voyager dans le pays et le gouverneur de la ville lui reprit le passeport partiel délivré pour herboriser sur les pentes du volcan d'Orizaba.

A-t-il exagéré les risques surmontés? Trompant la surveillance dont il était l'objet en prétextant aller «prendre des bains» dans une ville voisine, Thiéry de Menonville quitta Veracruz le 11 mai 1777 et se dirigea en toute discrétion vers Oaxaca en s'écartant, si nécessaire, de la route des muletiers. Il commençait ses étapes avant le lever du soleil, évitait de traverser les bourgs importants et payait généreusement les services demandés tout en restant «propre, gracieux et de bonne humeur». Lors du bref séjour passé autour d'Oaxaca (du 20 au 23 mai), il acheta aux producteurs trois cents raquettes de nopal avec les cochenilles et des caisses pour les dissimuler sous des amas de plantes et racines, ainsi que des mules pour le transport.

Après huit jours et 900 kilomètres de marche, il atteignit Veracruz le 31 mai. Afin de ne pas éveiller les soupçons des gardes, il escalada le rempart de la ville avant le lever du soleil pour aller se changer. Il en ressortit discrètement pour récupérer son chargement laissé aux soins de son muletier. Après avoir «chatouillé la vanité espagnole» du gardien de la porte, il obtint l'autorisation d'entrer dans la ville avec ses mules avant l'arrivée des douaniers.

Son périple s'étant effectué «sans maladie, sans accident [...] et comme un songe», il prépara sans tarder son départ de Veracruz. Mais le voyage de retour en mer, du 8 juin au 4 septembre 1777, fut éprouvant. Après une longue escale à Campêche pour charger du bois de teinture, le navire essuya de terribles tempêtes dans le golfe du Mexique et au large de la Floride, des courants le contraignant à remonter jusqu'aux abords de Charleston. Thiéry de Menonville tenait son journal de bord, décrivait poissons et oiseaux, aérait consciencieusement insectes et nopals, sur lesquels les cochenilles pondaient malgré d'importantes pertes de raquettes.

Son comportement ne passa pas inaperçu: un matelot, s'étant saisi d'un insecte et l'ayant écrasé sur un bois blanc, révéla à ses camarades la contrebande. Pour déjouer les risques de dénonciation, Thiéry de Menonville imagina, avec la bienveillance du capitaine qui n'était pas dupe du larcin, «une farce ridicule» en prétextant que ces produits étaient destinés à

À gauche: © Gilbert Buti; à droite: © Shutterstock.com/Mabelin Santos

composer un remède contre la goutte. Et d'en confier aux matelots le procédé : « On pile les nopals, les cochenilles, la vanille et le jalap tous ensemble dans un grand mortier d'argent, on le fait bouillir, on en donne le jus à la dose d'une once au malade et on en fait des cataplasmes dont on lui enveloppe les pieds. »

En réponse aux pressantes demandes de son auditoire et donnant l'air de se faire prier, il ajouta, comme pour accréditer ses dires : « Il y entrait aussi du baume de la Mecque, de l'encens, de l'or en poudre, de l'argent en feuilles » et, à demi-voix mais de manière à être bien entendu, « du linge béni qui avait touché les reliques de Santo Torribio, puis quelques mots latins pour rendre la recette on ne peut plus respectable ». Thiéry de Menonville était ravi : « Les matelots ébaubis demeurèrent convaincus de l'innocence de mes intentions et de l'efficacité de mon remède. »

Débarqué le 4 septembre à la pointe nord-ouest de Saint-Domingue à cause du mauvais temps, il ne parvint que le 25 à Port-au-Prince avec son précieux chargement.

## L'ACCLIMATATION DE LA GRANA À SAINT-DOMINGUE

Ayant été informé du succès de l'entreprise de Thiéry de Menonville, l'État lui accorda le titre de botaniste du roi avec 6000 livres tournois de traitement annuel, tandis que les administrateurs de l'île lui concédaient un terrain pour établir une nopaleraie. Sans perdre de temps, il acclimata le nopal et la cochenille fine, tout en menant des essais sur la cochenille sauvage, ou sylvestre, ainsi que sur une cochenille indigène, découverte après son retour.

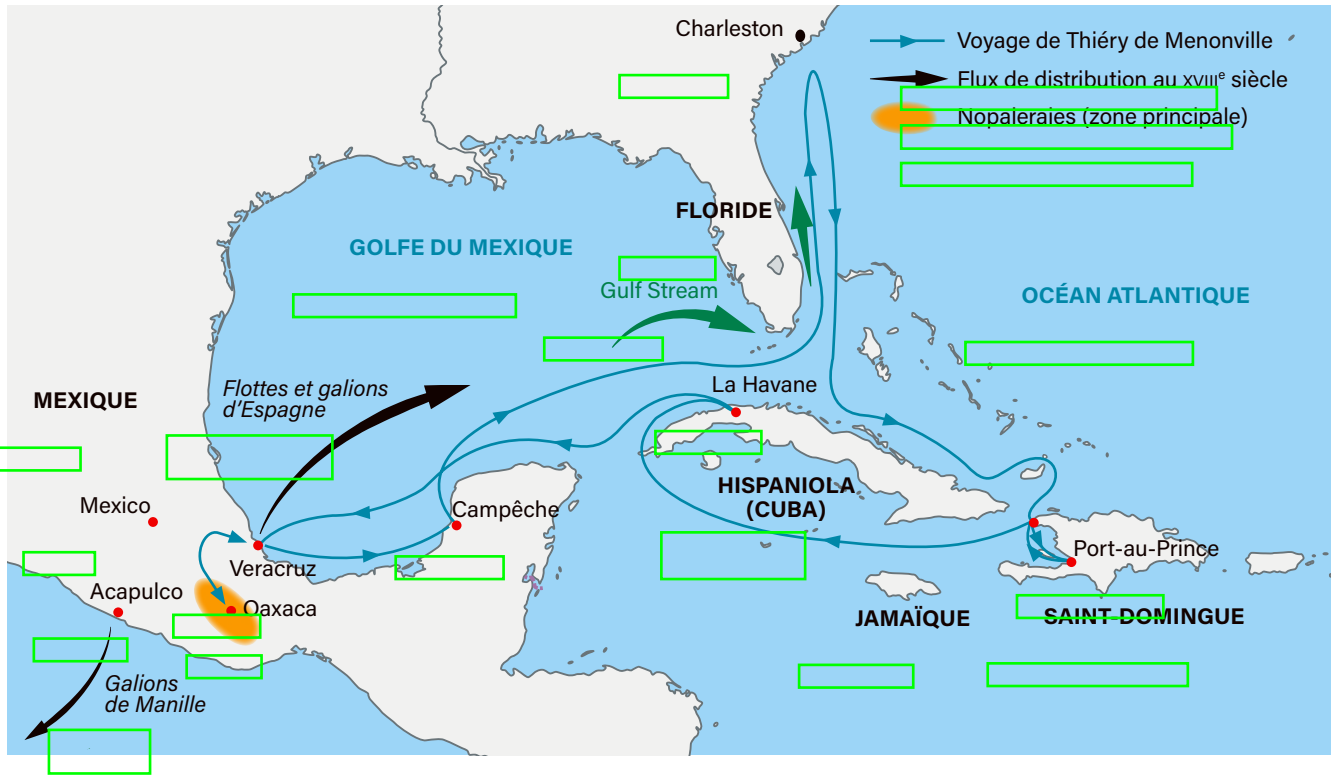
Le 12 mai 1779, il adressa des insectes de diverses qualités à Macquer, devenu commissaire du Bureau du commerce pour la chimie et directeur des teintures à la manufacture royale des Gobelins. Après avoir effectué des essais de teinture et comparé les résultats avec un échantillon teint à la cochenille fine « du commerce », Macquer estima que ce dernier avait plus d'éclat que celui teint avec la cochenille de Thiéry de Menonville, mais qu'il en serait autrement dans quelques années, quand il aurait perfectionné cette culture et obtenu une cochenille en grains aussi gros que celle du Mexique. Il ajouta : « Cet objet étant un des plus importants pour notre commerce et nos manufactures, je pense qu'on ne peut trop encourager M. Thiéry à donner tous ses soins à la culture si bien commencée. »

Ayant reçu le titre de correspondant de l'Académie des sciences, le prix d'émulation et une indemnité pour couronner ses travaux, Thiéry de Menonville poursuivit son entreprise. Mais au début de l'année 1780, il fit état de son découragement : « plusieurs maladies » avaient altéré sa santé et il était l'objet de calomnies qui le déshonoraient « aux yeux de tous les gens de lettres ». Des rumeurs l'accusaient d'avoir volé la cochenille et le nopal mexicains, d'avoir abusé les cultivateurs locaux. Il s'en défendit avec véhémence dans les dernières pages de son récit : « Dérober la cochenille eut été suivant moi une bassesse et une injustice sociale à l'égard du cultivateur dont j'aurais expolié le jardin, c'est ce que j'ai toujours voulu éviter, et je crois y avoir réussi, car en l'achetant je n'ai fait tort qu'à la nation de chez qui je l'emportais, je me suis à ce moment considéré moi-même comme une autre nation à laquelle la nature avait donné les mêmes prérogatives et les mêmes droits à ses faveurs. » Si « larcin » il y eut, ce ne fut donc qu'au détriment de la couronne espagnole.

Face à ces rumeurs et estimant que le pouvoir central ne le soutenait pas, il considéra que sa mission était finie : « Je n'ai plus rien à faire ici. » Qu'il se soit agi de malveillance, de jalousie ou de vengeance à l'encontre d'un homme voué à sa passion, sans concession, qui refusait les conventions sociales de la vie mondaine locale, l'amertume de Thiéry de Menonville était profonde. Des « fièvres malignes » mirent fin aux tourments du botaniste, qui mourut à Port-au-Prince le 6 août 1780 à l'âge de 41 ans. Son aventure et les causes de son échec relatif auraient été oubliées sans le travail d'édition mené à Saint-Domingue par le Cercle des philadelphes, académie scientifique et médicale fondée en août 1784 au Cap-Français (aujourd'hui Cap-Haïtien) sur le modèle des académies royales de province en métropole.

**Thiéry de Menonville mourut à 41 ans, malade et déshonoré, accusé d'avoir volé la cochenille**

Après la tentative de Thiéry de Menonville, d'autres savants et administrateurs prirent le relais. Ce fut le cas d'Augustin-Jean Brulley. Nommé à Saint-Domingue en août 1780, cet officier de justice, futur commissaire de la République, le fit avec d'autant plus d'intérêt qu'il avait aussi adressé, vers 1775, un mémoire




**Le périple de Thiéry de Menonville vers les nopaleraies d'Oaxaca, au Mexique, débuta à Port-au-Prince le 21 janvier 1777. Si la mer fut clémente à l'aller, lui permettant d'accoster à Veracruz le 25 mars, le retour à Port-au-Prince, du 8 juin au 25 septembre, fut plus chaotique. De violentes tempêtes et de puissants courants détournèrent son navire jusqu'aux abords de Charleston, en Floride.**

à Sartine proposant l'acclimatation de la *grana* à Saint-Domingue. Ayant repéré des nopals mieux adaptés à son projet, mais situés dans la partie espagnole de l'île, il reproduisit, pour s'en emparer, le « périlleux larcin » de Thiéry de Menonville, en échange de sucre, de café et de tafia. Il créa ainsi une immense nopaleraie de 4000 nopals, mais pour la seule cochenille sauvage, ou sylvestre, car la *grana fina* avait été perdue.

Cependant, les troubles qui aboutirent à l'indépendance d'Haïti, en 1804, mirent un terme aux résultats prometteurs de Brulley. Au XIXe siècle, des Français et des Hollandais réactivèrent, loin du Nouveau Monde, le projet de Thiéry de Menonville, mais ce furent les Espagnols qui y parvinrent dans les Canaries à partir des années 1840, suivis des Français avec une production plus limitée en Afrique du Nord, avant que la *grana* ne soit concurrencée par les colorants de synthèse.

## LA COCHENILLE, PORTEUSE DE SAVOIRS

À lui seul, l'épisode de Thiéry de Menonville nous aura entraînés de Paris à Port-au-Prince, Veracruz et Oaxaca. Mais menée sur la longue durée, la traque de la cochenille invite à suivre la construction d'un espace économique et relationnel à la dimension du monde, d'Oaxaca et Veracruz à Bassora en passant par Séville, Cadix, Marseille, voire Acapulco et Manille. Chemin faisant, elle invite également à retrouver les usages d'un insecte apprivoisé et éduqué en Amérique centrale par les peuples précolombiens, à retracer ses premières rencontres avec les conquistadores espagnols, à débrouiller les controverses parfois entretenues sur la nature du produit, à décrypter les secrets, les interdictions et les dissimulations dont il a été l'objet, à reconstituer sa diffusion, à relever les techniques agricoles, artisanales, commerciales et bancaires ainsi que les hommes qui en ont été à l'initiative et les ont contrôlées.

Cette saga rappelle que les produits sont porteurs de savoirs et que leurs passeurs, officiels et clandestins, peuvent être multiples : botanistes, apothicaires, chimistes, « naturalistes », teinturiers, artistes, républicains des lettres et négociants, dans une chaîne de circulation à l'échelle mondiale. Accompagner sur le temps long la ressource et ses usages permet d'en observer son soudain engouement et d'en saisir son brutal déclassement sous les effets d'innovations techniques ou de découvertes scientifiques. À la convoitise d'hier pour cet étonnant insecte répond l'indifférence du temps présent. Sans ce parcours au fil des siècles, n'est-il pas difficile d'imaginer que l'acide carminique produit par cet insecte, devenu aujourd'hui essentiellement un colorant alimentaire et cosmétique réduit à une banale codification commerciale (E 120) ne faisant guère rêver, ait pu susciter de surprenantes aventures, à l'instar de celle entreprise, « sous peine de la vie », par Thiéry de Menonville ? Dans un contexte de décloisonnement disciplinaire des sciences humaines, retracer le fabuleux destin de ce petit insecte mexicain contribue, dans une certaine mesure, à la complexe odyssée des savoirs. ■

## BIBLIOGRAPHIE


D. Trichaud-Buti et G. Buti, **Rouge cochenille. Histoire d'un insecte qui colora le monde. XVIe-XXIe siècle**, CNRS, 2021.

P. Y. Beaurepaire, **Les Lumières et le Monde. Voyager, explorer, collectionner**, Belin, 2019.

D. Pestre (dir.), **Histoire des sciences et des savoirs**, tome 1, De la Renaissance aux Lumières, Seuil, 2015.

D. Cardon, **Le Monde des Teintures naturelles**, 2e éd. augmentée, Belin, 2014.


© Pour la Science, d'après Gilbert Buti et Michel Courties ; Shutterstock.com/Peter Hermes Furian (fond de carte)

# RENDEZ-VOUS

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

# DES POINTS QUI S'ALIGNENT… OU PAS

**Les alignements possibles d'un ensemble fini de points du plan posent de redoutables et délicieux problèmes.**

L'AUTEUR



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

Par deux points distincts passe une droite unique, comme chacun sait. Intéressons-nous ici aux alignements de trois points, ou plus. Une série de problèmes géométriques apparemment simples se posent naturellement à ce sujet et certains sont d'une subtilité inattendue et mobilisent des raisonnements impliquant des théories mathématiques variées. Ils ont été récemment l'occasion de progrès dus au génie des mathématiciens qui s'y sont intéressés ou à la mise au point de puissants programmes de calcul.

## JAMAIS MOINS DE TROIS POINTS PAR ALIGNEMENT

Commençons par un problème qu'il est amusant de résoudre seul avec du papier et un crayon. Le problème fut posé en 1893 par le mathématicien anglais James Sylvester dans le journal *Educational Times*: montrer que pour un ensemble fini E de points du plan, soit tous les points sont alignés, soit il existe deux points tels que la droite qu'ils définissent ne rencontre aucun autre point de E.

Une solution fut rapidement proposée, mais elle était incomplète; la première solution correcte publiée est due au mathématicien allemand Eberhard Melchior, en 1941. Les vicissitudes de l'histoire ont eu pour conséquence que sa solution a été dans un premier temps ignorée. Melchior publia en effet son résultat dans une revue qui, soumise à l'idéologie nazie, n'acceptait que des articles rédigés par des Aryens… ce qui avait pour conséquence qu'elle était peu diffusée hors d'Allemagne.

En 1943, sans connaître ni la question de Sylvester ni la solution de Melchior, le Hongrois Paul Erdős redécouvrit seul le problème. Il raconta plus tard: «Je m'attendais à ce que ce soit facile, mais à ma grande surprise et fort déçu, je n'ai pas su trouver de démonstration. J'ai indiqué le problème à Tibor Gallai qui, lui, a très vite découvert une ingénieuse solution.»

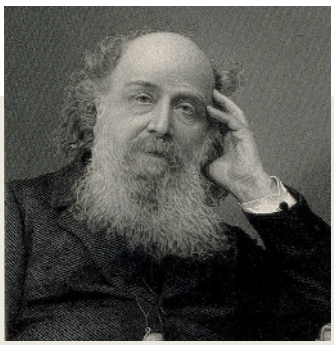
La preuve du mathématicien hongrois Tibor Gallai fut publiée en 1944 et le résultat porte aujourd'hui le nom de «théorème de Sylvester-Gallai». On a trouvé depuis des solutions assez courtes et compréhensibles par tout le monde; l'encadré 1 en présente une de quelques lignes proposée en 1958 par le mathématicien américain Leroy Kelly. Le sujet a dès lors suscité un immense intérêt. D'autres démonstrations ont été conçues, des variantes ont été envisagées, et toutes sortes de généralisations étudiées.

Pour parler commodément de ces problèmes, on convient que les droites définies par deux points de l'ensemble fini E de points du plan et ne contenant pas de troisième point de E seront dénommées «droites ordinaires» de E. Avec ce vocabulaire, le théorème de Sylvester-Gallai signifie que tout ensemble fini E de points non colinéaires du plan détermine au moins une droite ordinaire de E.

Une fois résolu le problème de Sylvester, une question vient naturellement à l'esprit: est-il

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

## THÉORÈME DE SYLVESTER-GALLAI : LA DÉMONSTRATION DE LEROY KELLY



James Joseph Sylvester (1814-1897)

**Théorème de Sylvester-Gallai**
Soit E un ensemble fini de points du plan, alors soit (i) tous les points sont alignés, soit (ii) il existe une droite qui contient exactement deux points de E.

Autrement dit : si tous les points d'un ensemble fini E de points du plan ne sont pas alignés, il est impossible que toutes les droites déterminées par deux points de E en rencontrent un troisième. Ou encore : si, à chaque couple A, B de points d'un ensemble fini E de points du plan, on peut en associer un troisième, C, différent de A et B tels que A, B et C soient alignés, alors c'est que tous les points de E sont alignés.

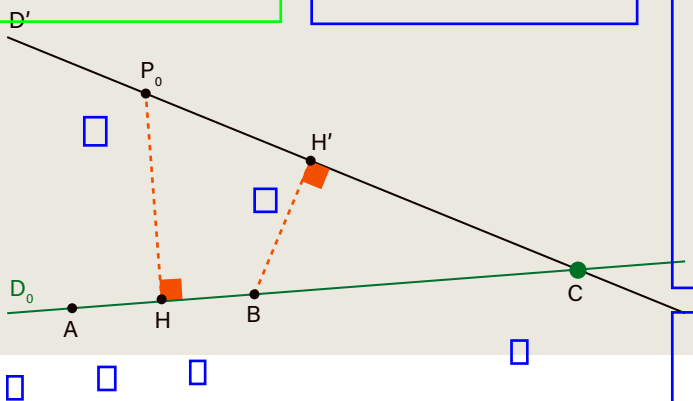
**Démonstration**
On suppose que les points de E ne sont pas alignés. Appelons « droite de E » toute droite qui contient au moins deux points de E, et montrons qu'il en existe une, dénommée « droite ordinaire » de E, ne contenant pas de troisième point de E.

À chaque droite D de E, on associe la distance minimum entre D et les points de E extérieurs à D, qu'on note *min*(D). Il n'y a qu'un nombre fini de droites de E, donc l'une des valeurs *min*(D) est la plus petite possible. Soit la droite $D_0$ associée à cette plus petite valeur possible et soit $P_0$ le point de E dont la distance à $D_0$ vaut *min*($D_0$). Par construction, la distance entre $P_0$ et $D_0$ est la plus petite possible entre une droite de E et un point de E n'y appartenant pas.

Supposons que $D_0$ contienne trois points différents A, B et C. Soit H le point d'intersection de $D_0$ avec la perpendiculaire à $D_0$ passant par $P_0$. Deux des points A, B et C se trouvent d'un même côté de H. On peut supposer que ce sont B et C, et que C est celui qui est le plus éloigné de H.

Soit D′ la droite de E qui passe par C et $P_0$ ; elle ne contient pas B (sinon, $P_0$ serait sur $D_0$). Soit H′ l'intersection de la perpendiculaire à D′ passant par B. Les triangles rectangles $P_0HC$ et BCH′ sont semblables, et BCH′ est plus petit que $P_0HC$ car l'hypoténuse de BCH′ est incluse dans l'un des côtés de $P_0HC$. Il en résulte que BH′ est strictement plus petit que $P_0H$. Par conséquent, la distance entre $P_0$ et $D_0$ n'est pas la plus petite possible entre une droite de E et un point de E n'y appartenant pas, contrairement à la définition de $P_0$ et $D_0$.

En conclusion, il n'est pas possible que $D_0$ contienne trois points. Donc $D_0$ n'en contient que deux. C'est ce que nous voulions démontrer.




possible qu'un tel ensemble fini E ne détermine qu'une seule droite ordinaire? Et, s'il en détermine plusieurs, peut-on avoir une idée de leur nombre minimal, qui dépend sans doute du nombre $n$ de points de E?

Notons $min_n$ le nombre minimum de droites ordinaires d'un ensemble E de $n$ points non colinéaires du plan. L'article de Melchior ne démontrait pas seulement le théorème de Sylvester-Gallai, qui signifie $min_n \geq 1$, mais établissait que $min_n \geq 3$. En 1951, Theodore Motzkin (fils du leader sioniste Leo Motzkin : ce sujet mathématique est imprégné d'histoire !) démontra que $min_n \geq n^{1/2}$. Le résultat fut amélioré en 1993 par les Canadiens Joseph Csima et Eric Sawyer, qui prouvèrent que $min_n \geq 6n/13$.

La mathématicien hongrois Gabriel Dirac (fils de la sœur d'Eugene Wigner, qui a épousé Paul Dirac) affirma alors qu'il était probable que $min_n \geq n/2$. Cette affirmation, dénommée « conjecture de Dirac-Motzkin », est maintenant presque démontrée. En effet, Ben Green et Terence Tao ont établi en 2013 qu'il existe un $n_0$ tel que :

– si $n \geq n_0$ et si $n$ est impair, alors $min_n \geq 3\lfloor n/4 \rfloor$ où $\lfloor k \rfloor$ désigne la partie entière de $k$, c'est-à-dire le plus grand entier inférieur ou égal à $k$ ;
– si $n \geq n_0$ est pair, alors $min_n \geq n/2$.

Pour que la conjecture soit complètement établie, il reste à vérifier qu'elle est vraie pour les $n \leq n_0$, c'est-à-dire pour un nombre fini de cas. Ce n'est qu'un travail fini, en théorie faisable avec un ordinateur… Malheureusement, étant donné ce qu'on sait de $n_0$, le calcul à mener serait trop long.

On connaît une infinité de configurations de points où la borne $n/2$ est atteinte (*voir l'encadré 2*). Seules deux exceptions à l'affirmation que $min_n \geq n/2$ sont connues. Elles correspondent à 7 points déterminant 3 droites ordinaires, et 13 points déterminant 6 droites ordinaires. Il est donc possible que le $n_0$ du théorème de Green et Tao soit l'entier 14.

## RECHERCHE ALGORITHMIQUE

La démonstration expliquée dans l'encadré 1 revient à s'intéresser à la plus petite distance possible entre une droite déterminée par

© Wellcome Collection gallery/CC-BY-4.0

# 2 POINTS À L'INFINI ET DUALITÉ

Les résultats démontrés par Ben Green et Terence Tao en 2013 indiquent en particulier que pour tout entier $n$ dépassant un certain entier $n_0$ et tout ensemble E de $n$ points non colinéaires, il existe au moins $[n/2]$ droites passant exactement par deux points de E, droites dites « ordinaires » de E. La notation $[x]$ désigne la partie entière de $x$.

On ne connaît pour l'instant que deux exceptions à ce résultat, pour $n = 7$ et $n = 13$. Il se peut donc que $n_0 = 14$. Ces deux exceptions sont représentées sur les dessins A et B.

Pour la première, on voit 7 points *(en rouge)* qui créent seulement 3 droites ordinaires de E, en noir.

La seconde exception, avec 13 points et seulement 6 droites ordinaires, est représentée sur le schéma B en utilisant le plan projectif.

Le plan projectif est ce qu'on obtient à partir du plan ordinaire en ajoutant un point à l'infini pour chaque famille de droites parallèles : deux parallèles ont donc dans ce plan un point unique en commun. L'ensemble des points à l'infini définit une droite supplémentaire du plan. On démontre que toute configuration finie de points et de droites qu'on peut obtenir en utilisant ces points à l'infini a un équivalent sans les utiliser sur le plan ordinaire.

Le dessin B donne une représentation avec des parallèles et l'indication des points à l'infini utilisés. Il y a 13 points, dont 4 à l'infini, et seulement 6 droites ordinaires tracées en noir.

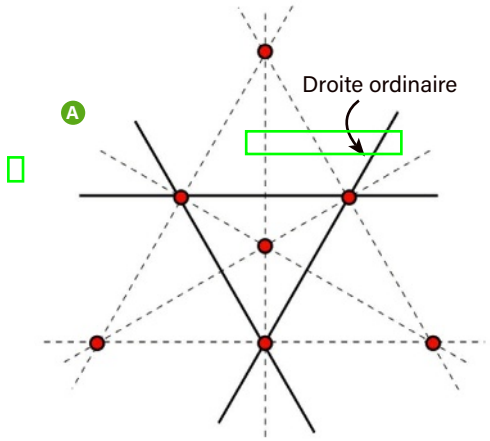
Le dessin C reprend le dessin B en plaçant les points et les droites sur un plan en perspective avec une ligne d'horizon qui correspond à l'ensemble des points à l'infini. Les quatre points à l'infini de la configuration B de 13 points sont maintenant tous à distance finie sur la ligne d'horizon, même si A et D sont un peu trop à gauche et à droite pour qu'on les voie.

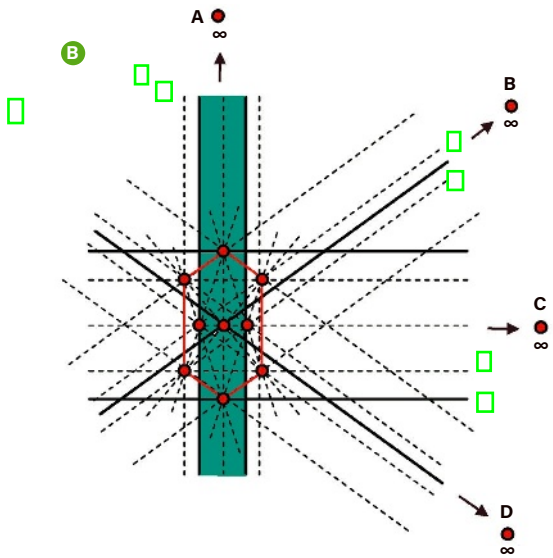
Le procédé pour ramener des points à l'infini du plan projectif à distance finie est général et son existence rend plus facile la recherche et la représentation des configurations qu'on rencontre au sujet des problèmes d'alignement de points.

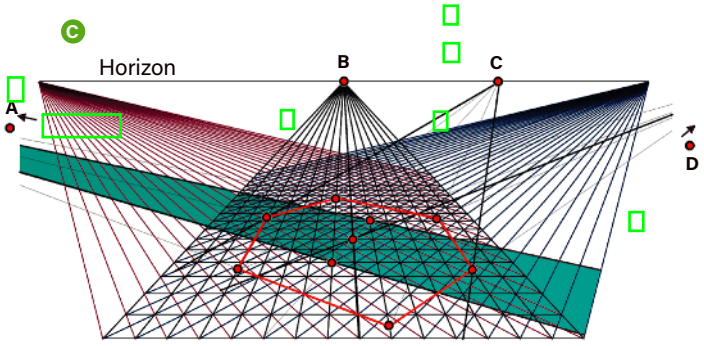
Le dessin D utilise encore des points à l'infini. Il représente une configuration de 10 points, dont 5 à l'infini, n'engendrant que 5 droites ordinaires. La configuration due au mathématicien hongrois Károly Böröczky se généralise avec $2m$ points et $m$ droites ordinaires. Elle montre que le résultat de Ben Green et Terence Tao est le meilleur possible : si $n$ est pair, on ne peut pas prouver qu'il y a toujours plus de $n/2$ droites ordinaires pour $n$ points non colinéaires.

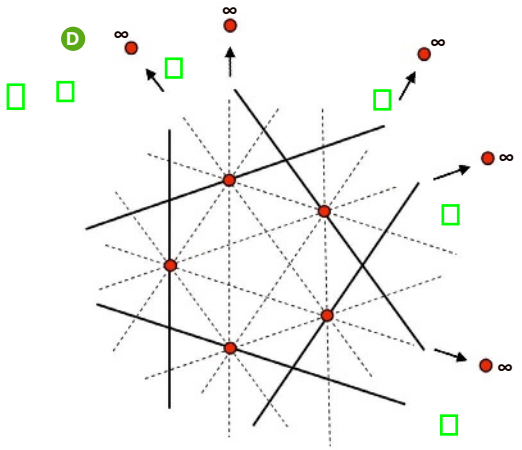
Dans le plan projectif, il existe une dualité parfaite entre points et droites. L'affirmation « par deux points distincts passe une droite unique » devient par dualité « deux droites distinctes se rencontrent en un point unique ». Tout énoncé, et toute figure, concernant les points et les droites donne un énoncé dual et une figure duale où les mots « droite » et « point » sont échangés.

Ainsi, le théorème de Sylvester-Gallai qui s'énonce : « Tout ensemble fini E de points non colinéaires définit au moins une droite passant par seulement deux points de E » devient, par dualité : « Tout ensemble fini E de droites ne passant pas toutes par un même point définit au moins un point qui n'appartient qu'à deux droites de E ».




© Pour la Science

deux points de E et un point à l'extérieur de cette droite. Elle permet de définir un algorithme qui, pour tout ensemble E de $n$ points non colinéaires, trouve deux points de E déterminant une droite ordinaire de E (c'est-à-dire ne rencontrant pas d'autres points de E). L'algorithme consiste à prendre tous les triplets (A, B, C) de points différents de E et à calculer la distance de A à la droite BC, de B à AC et de C à AB. La plus petite valeur obtenue quand on fait défiler tous les triplets, par exemple pour la distance de A à BC, indique que BC est une droite ordinaire. Le fait d'envisager tous les triplets de points de E a pour conséquence que l'algorithme donne sa réponse en un nombre d'étapes qui, dans le pire des cas, est proportionnel à $n^3$.

Une meilleure efficacité est possible. Herbert Edelsbrunner et Leonidas Guibas ont proposé en 1989 un algorithme dont le temps de calcul est au pire proportionnel à $n^2$. Le résultat a encore été amélioré en 1997: Asish Mukhopadhyay, Alok Agrawal, et Ravi Hosabettu ont trouvé un algorithme qui ne demande cette fois qu'un nombre d'étapes proportionnel à $n\log(n)$ pour trouver une droite ordinaire dans un ensemble de $n$ points non colinéaires du plan.

## EXTENSIONS ET EXCEPTIONS

Le théorème de Sylvester-Gallai se généralise-t-il à d'autres géométries? La question a été soigneusement étudiée et la réponse est intéressante, mais un peu compliquée car elle varie d'une géométrie à l'autre.

En dimension $n$, c'est-à-dire en considérant l'espace euclidien défini par les $n$-uplets de nombres réels, le théorème reste vrai. Voici le raisonnement qui le démontre. On se donne un ensemble E de $k$ points non colinéaires dans l'espace, notés $A_1$, $A_2$, ..., $A_k$. On en prend trois non colinéaires, il détermine un plan P. On projette les $k$ points orthogonalement sur P, ce qui donne $k$ points $B_1$, $B_2$, ..., $B_k$ de P qui sont non colinéaires, car les trois points utilisés sont restés inchangés par la projection. Le théorème de Sylvester-Gallai appliqué à ce plan et ces points indique qu'il existe deux points $B_i$ et $B_j$ déterminant une droite D qui ne contient aucun autre point $B_m$. Les deux points $A_i$ et $A_j$ déterminent dans l'espace une droite qui ne contient aucun autre point $A_h$, sinon le point $B_h$ serait aligné avec $B_i$ et $B_j$ (car la projection de points colinéaires donne des points colinéaires). Les points $A_1$, $A_2$, ..., $A_k$ déterminent donc dans l'espace au moins une droite ordinaire de E.

Voici un autre exemple où le théorème reste vrai. Le plan projectif est obtenu en ajoutant un point à l'infini pour chaque famille de droites parallèles du plan ordinaire, point où se rencontrent toutes les droites de la famille (*voir l'encadré 2*). Ces points ajoutés à l'infini forment une nouvelle droite. Le théorème de Sylvester-Gallai reste vrai pour le plan projectif habituel, et il est d'ailleurs bien commode de se placer dans cette géométrie avec des points à l'infini, car toute configuration finie de points et de droites qu'on trouve en géométrie projective du plan possède un équivalent en géométrie habituelle (sans point à l'infini). Pour dessiner des configurations de points aux propriétés particulières, on peut donc raisonner en considérant que deux parallèles se croisent en un point (*voir l'encadré 2 pour des exemples de ce type de considérations et la méthode pour ramener les points à l'infini à distance finie*).

Le plan projectif utilisant les nombres complexes donne un exemple de géométrie où le théorème de Sylvester-Gallai n'est plus vrai. On peut en effet y construire une structure appelée «configuration de Hesse» découverte par le

## LA CONFIGURATION DE HESSE

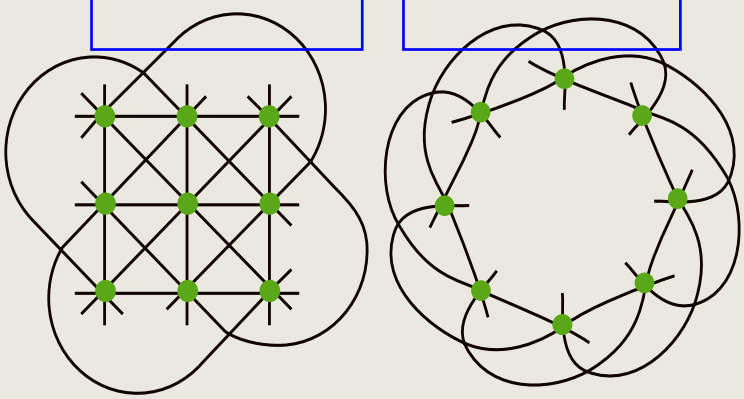
**3**

**La configuration de Hesse figurée ci-dessous a été imaginée par le mathématicien Colin Maclaurin (1698-1746) et étudiée par Otto Hesse (1811-1874). Elle est composée de neuf points qui déterminent exactement douze droites passant chacune exactement par trois points. Elle ne peut pas exister sur le plan ordinaire, ni sur le plan projectif, car elle contredirait le théorème de Sylvester-Gallai.**

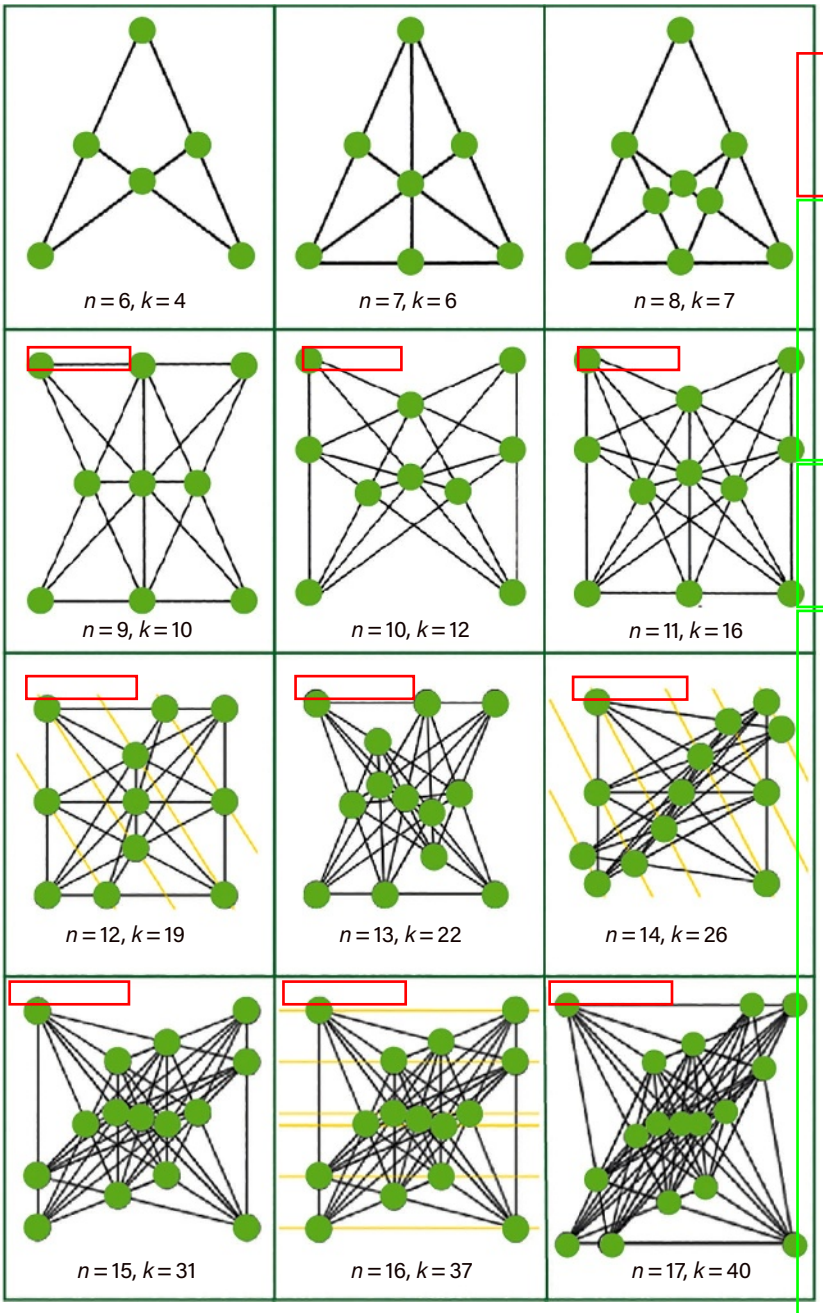
**En revanche, on peut la construire dans diverses géométries fondées sur les nombres complexes ou sur les corps finis.**

**C'est un objet géométrique étrange qui donne lieu aujourd'hui encore à des recherches dont par exemple celles-ci : - F. Polizzi *et al.*, « What are Sylvester-Gallai configurations in the complex projective plane ? », 2017 (https://bit.ly/3wMKNag). - A. Bassa et A. U. O. Kisisel, « The only complex 4-net is the Hesse configuration », prépublication arXiv, 2020 (https://arxiv.org/abs/2002.02660).**

**La configuration de Möbius-Kantor, également représentée ci-dessous, est composée de huit droites de trois points, sans droite ordinaire. Elle contredit aussi le théorème de Sylvester-Gallai. On ne peut donc pas la trouver dans le plan ordinaire. Certaines géométries, dont celle du plan projectif complexe, la rendent possible (voir https://en.wikipedia.org/wiki/Möbius–Kantor_configuration).**



Configuration de Hesse — Configuration de Möbius-Kantor




# 4 MAXIMUM D'ALIGNEMENTS DE TROIS POINTS

**On cherche à créer le plus grand nombre possible d'alignements de trois points avec un nombre donné de points. Amusez-vous à rechercher les solutions pour :**
**7 points et 6 lignes de 3 points,**
**8 points et 7 lignes de 3 points,**
**9 points et 10 lignes de 3 points,**
**10 points et 12 lignes de 3 points,**
**11 points et 16 lignes de 3 points,**
**12 points et 19 lignes de 3 points,**
**13 points et 22 lignes de 3 points,**
**14 points et 26 lignes de 3 points,**
**15 points et 31 lignes de 3 points,**
**16 points et 37 lignes de 3 points,**
**17 points et 40 lignes de 3 points,**
**18 points et 46 lignes de 3 points.**

**Pour toutes les valeurs présentées ici, sauf *n* = 17, on a prouvé qu'on ne pouvait pas faire un plus grand nombre d'alignements que ceux présentés sur la figure. Pour *n*=17, on sait seulement qu'il est impossible de dépasser 42. Voir dans le tableau du texte d'autres questions incomplètement résolues. Certaines solutions ont été dessinées avec des points à l'infini *(lignes en jaune)*. L'encadré 2 explique comment en déduire une solution sans point à l'infini si on le souhaite.**

mathématicien Colin Maclaurin (1698-1746) et étudiée par Otto Hesse (1811-1874). Elle est composée de 9 points qui déterminent exactement 12 droites passant chacune exactement par 3 points (*voir l'encadré 3*).

La configuration de Hesse existe aussi pour diverses géométries finies pour lesquelles le théorème de Sylvester-Gallai ne sera pas vrai. Considérons par exemple la géométrie définie par les 9 couples de nombres entiers modulo 3. Les droites sont les ensembles de couples $(X, Y)$ de nombres entiers modulo 3 vérifiant une équation du type $aX+bY=c$ (modulo 3).

Détaillons les objets de cette géométrie. Le plan ne comporte que neuf points: (2, 0), (2, 1), (2, 2), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (0, 0), (0, 1) et (0, 2). Il contient exactement 12 droites de 3 points chacune.

Pour trouver ces droites, on écrit de toutes les façons possibles les équations d'une droite. Chacune est de la forme $aX+bY=c$ en prenant en compte que l'on calcule modulo 3. Les paramètres $a$, $b$ et $c$ ont donc trois valeurs possibles: 0, 1 et 2. Cela fait *a priori* $3\times3\times3 = 27$ équations possibles, mais certaines sont équivalentes comme $X+Y=0$ et $2X+2Y=0$ qui ont chacune les trois mêmes points (0, 0), (1, 2) et (2, 1). Après simplification, il reste exactement 12 droites, dont voici la liste:
– la droite d'équation $X=0$, qui comporte les trois points (0, 0), (0, 1), et (0, 2);
– la droite d'équation $X=1$, dont les trois points sont (1, 0),(1, 1) et (1, 2);
– $X=2$, qui contient (2, 0),(2, 1) et(2, 2);
– $Y=0$, qui contient (0, 0),(1, 0) et(2, 0);
– $Y=1$, qui contient (0, 1),(1, 1) et(2, 1);
– $Y=2$, qui contient (0, 2),(1, 2) et (2, 2);
– $X+Y=0$, qui contient (0, 0),(1, 2) et (2, 1);
– $X+Y=1$, qui contient (0, 1),(1, 0) et(2, 2);
– $X+Y=2$, qui contient (0, 2),(2, 0) et (1, 1);
– $X+2Y=0$, qui contient (0, 0),(1, 1) et (2, 2);
– $X+2Y=1$, qui contient (0, 2),(1, 0) et (2, 1);
– $X+2Y=2$, qui contient (0, 1),(1, 2) et (2, 0).

Plusieurs études ont été menées concernant les axiomes précis qu'il faut retenir de façon à pouvoir démontrer le théorème de Sylvester-Gallai. En 1969, le géomètre britannique Harold Coxeter a noté que la géométrie fondée uniquement sur la notion d'ordre, c'est-à-dire qui utilise le prédicat «le point X est entre les points A et B», permet d'obtenir le théorème de Sylvester-Gallai. Pour Coxeter, utiliser la notion de distance entre un point et une droite comme dans la preuve de Kelly détaillée dans l'encadré 1 revient à «utiliser un marteau-pilon pour écraser une mouche».

La question de l'axiomatique nécessaire et suffisante pour que le théorème de Sylvester-Gallai soit valide est maintenant bien comprise grâce aux travaux de Victor Pambuccian publiés en 2009 (*voir la bibliographie*).

Les alignements de points du plan suggèrent aussi une série de questions ludiques qu'on attaquera comme des sudokus avec du papier et un crayon, ou qu'on programmera quand cela devient trop compliqué. Ces problèmes portent le nom de « problèmes des vergers » car on peut les formuler en s'interrogeant sur la façon de choisir les emplacements des arbres à planter dans un verger.

## LE PROBLÈME DES VERGERS

Les plus simples de ces problèmes sont les problèmes de la maximisation des alignements de trois points : comment disposer $n$ points sur le plan de façon à obtenir le plus grand nombre possible d'alignements de trois points ?

Sans consulter l'encadré 4 qui donne des solutions, posez-vous les problèmes suivants, de difficulté croissante :

– Disposer 6 points de telle façon qu'ils engendrent 4 lignes de trois points ;

– Disposer 7 points de telle façon qu'ils engendrent 6 lignes de trois points ;

– Disposer 8 points de telle façon qu'ils engendrent 7 lignes de trois points ;

– Disposer 9 points de telle façon qu'ils engendrent 10 lignes de trois points ;

– Disposer 10 points de telle façon qu'ils engendrent 12 lignes de trois points ;

– Disposer 11 points de telle façon qu'ils engendrent 16 lignes de trois points.

Poursuivez plus loin en recherchant, pour chaque entier $n$, le nombre maximal de lignes de trois points qu'il est possible d'obtenir en les plaçant sur un plan.

Trouver une configuration de $n$ points engendrant $k$ lignes de trois points est bien, mais comment être certain qu'on ne peut pas faire mieux ? La question a été attentivement étudiée et l'état de l'art est indiqué dans le tableau suivant.

Alignements de trois points

| $n$ | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | 6 | 7 | 10 | 12 | 16 | 19 | 22 | 26 | 31 | 37 | 40 | 46 | 52 | 57 | 64 | 70 | 77 | 85 | 92 |
| $m$ | 6 | 7 | 10 | 12 | 16 | 19 | 22 | 26 | 32 | 37 | 42 | 48 | 54 | 60 | 67 | 73 | 81 | 88 | 96 |

Pour chaque entier $n$, la seconde ligne du tableau donne le nombre $k$ de droites de trois points que comporte la meilleure configuration connue de $n$ points. Sur la troisième ligne du tableau, le nombre $m$ indique qu'on sait démontrer qu'on ne peut pas faire mieux que $m$ alignements. Une égalité entre $k$ et $m$ signifie qu'on connaît une configuration de $n$ points donnant $k$ droites de trois points, et qu'on a prouvé qu'on ne pouvait pas faire mieux ; le problème est donc entièrement résolu pour cette valeur de $n$.

Lorsque le nombre $k$ indiqué sur la deuxième ligne est inférieur au nombre $m$ sur la troisième, cela signifie qu'on connaît une configuration de $n$ points donnant $k$ droites de trois points, mais qu'il pourrait en exister avec $m$ droites de trois points. Le problème n'est donc qu'imparfaitement résolu.

Le raisonnement suivant montre que le nombre maximum de lignes de trois points est inférieur à $\lfloor n(n-1)/6 \rfloor$ (où $\lfloor x \rfloor$ désigne la partie entière de $x$), ce qui permet d'écrire un résultat sur chacune des cases de la troisième ligne du tableau. Le nombre de paires de points différents dans un ensemble de $n$ points est $n(n-1)/2$ (nombre de sous-ensembles à deux éléments pris dans un ensemble à $n$ éléments). Une droite contenant les trois points A, B, et C contient trois de ces paires : {A, B}, {A, C}, {B, C}. Deux droites différentes de trois points ne peuvent pas contenir une même paire, car par deux points donnés passe une seule droite. Par conséquent, il y a au plus trois fois moins de droites de trois points que de paires de points ; il y a donc au plus $\lfloor n(n-1)/6 \rfloor$ droites de trois points avec $n$ points.

Ce résultat a été amélioré en 1993 par Joseph Csima et Eric Sawyer, qui ont établi la borne supérieure très légèrement meilleure : $\lfloor n^2/6 - 25n/78 \rfloor$.

Du côté des constructions générales, S. Burr, B. Grünbaum et N. Sloane proposèrent en 1974 une méthode générale pour disposer $n$ points déterminant $\lfloor n^2/6 - n/2 + 1 \rfloor$ alignements de trois points.

En 2013, Ben Green et Terence Tao ont montré que ce nombre ne peut pas être dépassé du moins pour tous les entiers $n$ plus grands qu'un certain $n_1$. Le problème est donc résolu pour tous les entiers au-delà de $n_1$, malheureusement à nouveau ce $n_1$ est très grand, ce qui laisse le problème imparfaitement résolu pour un grand nombre d'entiers inférieurs à ce $n_1$.

## ALIGNEMENTS DE QUATRE POINTS

Si à la place d'alignements de trois points, on s'intéresse aux alignements de quatre points, cinq points, etc., on tombe sur de nouvelles séries infinies de problèmes. Voici, pour les alignements de quatre points, le tableau de ce qui est connu. Le tableau est disposé comme celui qui portait sur les alignements de trois points.

Alignements de quatre points

| $n$ | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | 2 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 12 | 15 | 16 | 18 | 20 | 23 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| $m$ | 2 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 12 | 15 | 16 | 18 | 28 | 30 | 31 | 38 | 40 | 42 | 50 |

Il ne faudrait pas imaginer que la géométrie des alignements ne comportent que de petits problèmes faciles à résoudre. Les dizaines d'articles de recherche et plusieurs livres récents sur le sujet, dont nous n'avons fait qu'effleurer le contenu, attestent qu'il s'agit d'un sujet mathématique vieux de trois mille ans et toujours bien vivant. ■

## BIBLIOGRAPHIE


D. Eppstein, **Forbidden configurations in discrete geometry**, Cambridge University Press, 2018.

J. Pach, **Finite point configurations,** *Handbook of Discrete and Computational Geometry*, pp. 3-26, CRC Press, 2018.

E. Pegg, **Cultivating new solutions for the Orchard-Planting problem,** 2018 : https://bit.ly/3204ywH

B. Green et T. Tao, **On sets defining few ordinary lines,** *Discrete Comput. Geom.*, vol. 50, pp. 409-468, 2013.

V. Pambuccian, **A reverse analysis of the Sylvester-Gallai theorem**, *Notre Dame Journal of Formal Logic*, vol. 50(3), pp. 245-260, 2009.

M. Gardner, **Time Travel and Other Mathematical Bewilderments**, Freeman, pp. 277-290, 1988.

E. Melchior, **Über Vielseite der projektiven Ebene,** *Deutsche Math.*, vol. 5, pp. 461-475, 1941.

J. Sylvester, **Mathematical question 11851,** *Educational Times*, vol. 59, p. 98, 1893.

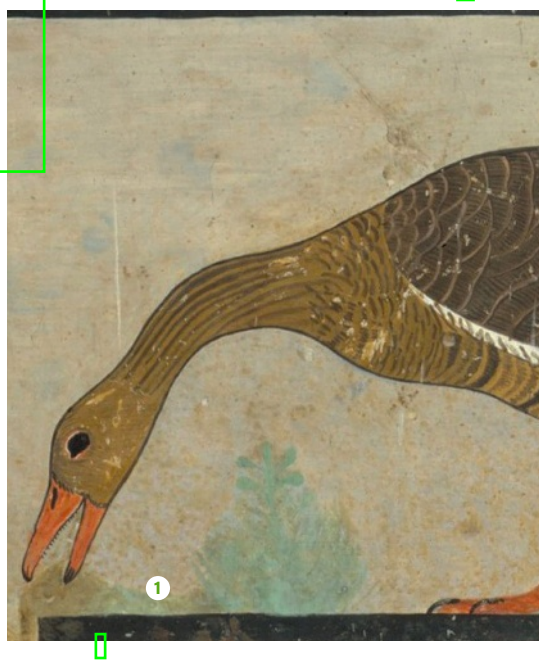
L'AUTEUR



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

# LES AVENTURIERS DE L'OIE PERDUE

**Une oie peinte il y a près de 4600 ans en Égypte serait l'unique trace d'une espèce aujourd'hui disparue.**



© C.K. Wilkinson

Les oies de Meïdoum, une fresque conservée au musée du Caire et prélevée dans le mastaba de Néfermaât et d'Itet *(les six oies sont alignées dans l'œuvre originale)*.



Au IVe siècle avant notre ère, des Romains reclus dans le Capitole échappent à un raid gaulois grâce, selon Tite-Live, à l'alerte donnée par… les «oies sacrées de Junon, que, malgré la plus cruelle disette, on avait épargnées; ce qui sauva Rome.» De fait, dans l'Antiquité, et dans plusieurs religions, l'oie avait acquis un statut particulier: elle est l'un des véhicules du dieu hindou Brahmā, la divinité gauloise Belisama chevauche une oie… Dans l'Égypte ancienne, ce volatile parfois divinisé a un statut tout aussi remarquable. Et il est le sujet de l'une des plus anciennes œuvres peintes trouvées dans ce pays, une frise découverte en 1871 par l'Italien Luigi Vassalli sur le site de Meïdoum, à 100 kilomètres au sud du Caire.

Là, se dresse la pyramide de Snéfrou, père de Khéops, qui a régné vers 2600 avant notre ère. Autour, plusieurs mastabas, c'est-à-dire des tombeaux monumentaux, sont éparpillés. C'est dans l'un d'eux, celui de Néfermaât (fils et vizir de Snéfrou) et son épouse Itet que l'on pouvait voir les six oies dites de Meïdoum avant que le pan de mur ne soit transporté au musée du Caire (*voir la reproduction ci-contre*).

Le réalisme est tel que l'on distingue plusieurs espèces. Mais lesquelles? Anthony Romilio, de l'université du Queensland, en Australie, s'est penché sur la question. Pour certaines, l'identification est simple et, par exemple, on reconnaît deux oies rieuses *Anser albifrons* 2. Pour d'autres, l'attribution est plus problématique. Ainsi, les deux oies 1 dont le bec est au ras du sol sont soit des oies des moissons, *Anser fabalis*, soit des oies cendrées, *Anser anser*, deux espèces morphologiquement très proches.

Quant aux oiseaux au poitrail roux, on a longtemps débattu : des bernaches à cou roux, *Branta ruficollis* ③ ? Ce n'est peut-être pas le cas. D'abord, l'aire de répartition de cette espèce ne correspond pas, car elles nichent au nord de la Sibérie et ne migrent que vers l'Europe du Sud-Est (Bulgarie, Roumanie, Ukraine…). Ensuite, l'analyse des palmipèdes selon le critère de Tobias, du nom de Joseph Tobias, de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, ne valide pas l'identification. Cette méthode, proposée en 2010 et d'ordinaire appliquée à des espèces actuelles, a été utilisée avec les caractéristiques anatomiques visibles sur les représentations de Meïdoum (couleur des pattes, taille relative du bec, pourtour des yeux…), c'est inédit pour une image.

Conclusion ? Les oies peintes se distinguent trop des bernaches à cou roux, essentiellement au niveau du cou, des flancs et de la poitrine, même en imaginant une licence artistique, et ce alors que toutes les espèces peintes dans le mastaba sont bien identifiables. Ces oies seraient plus probablement les représentantes d'une espèce vivant il y a plus de 4600 ans et aujourd'hui disparue. L'espèce en question rejoindrait alors la liste de celles, comme l'aurochs *Bos primigenius*, qui n'ont laissé de trace dans l'histoire que sous forme de représentations dans l'art égyptien. ■

A. Romilio, « Assessing "Meidum Geese" species identification with the "Tobias criteria" », *Journal of Archaeological Science : Reports*, vol. 36, 102834, 2021.

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





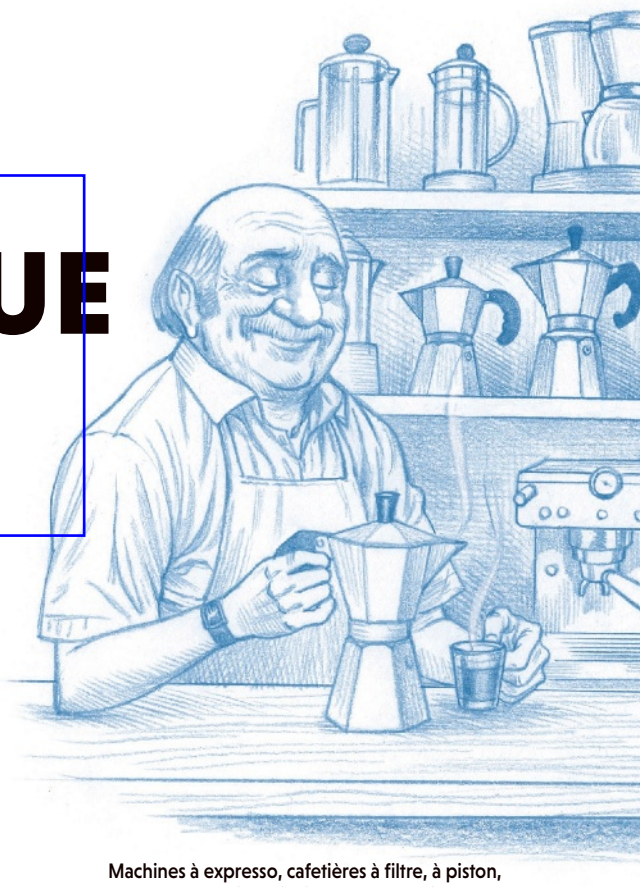

LES AUTEURS



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

# LA CAFETIÈRE QUI NE MANQUE PAS D'AIR

**Le fonctionnement de la cafetière italienne paraît simple. Il n'en présente pas moins quelques subtilités dont il faut tenir compte pour obtenir un café optimal.**



Machines à expresso, cafetières à filtre, à piston, à broyeur, cafetières italiennes... Le choix est vaste ! Un même café moulu donnera des résultats différents selon la température de l'eau, la pression, la durée du passage de l'eau dans la mouture, etc.

Pour les amateurs, rien ne vaut le café intense et corsé préparé avec une cafetière italienne. Inventée en 1933 par l'ingénieur italien Alfonso Bialetti, cette cafetière en aluminium est toujours commercialisée sous le nom de Moka Express, et d'autres marques l'ont imitée. Son utilisation est simplissime : remplir le réservoir inférieur d'eau, placer au-dessus le panier en forme d'entonnoir et le remplir de café moulu, visser la partie supérieure (la verseuse), placer sur le feu et attendre quelques minutes que l'eau remonte par la cheminée, traverse le café en extrayant ses arômes et vienne remplir la verseuse.

À y regarder de près, cependant, les choses ne sont pas si simples. Alors que la température idéale de l'eau pour l'extraction est de 90 °C, on lit souvent que si l'eau remonte dans la cafetière, c'est parce qu'elle bout. Plus curieux encore : chaque modèle de cafetière italienne est conçu pour préparer un nombre précis de tasses. Il est déconseillé de préparer deux tasses avec un modèle destiné à quatre tasses. Pourquoi ?

## ÉVAPORATION, MAIS PAS ÉBULLITION

Pour répondre à ces questions, voire optimiser la préparation du café, examinons plus en détail le fonctionnement de cette cafetière. Conformément à la notice, on remplit le réservoir d'eau jusqu'au niveau de la valve de sécurité. Une fois la verseuse vissée, ce qui assure l'étanchéité du dispositif, de l'eau et un petit volume d'air sec sont enfermés dans le réservoir. Lorsque l'eau chauffe, la pression de cet air augmente progressivement, puisque l'air s'échauffe et que de l'eau s'évapore.

La pression de la vapeur d'eau ajoute à celle de l'air sec une « pression partielle » d'autant plus grande que la température est élevée. Cette pression partielle atteint 1 atmosphère (1,01 bar) lorsque la température vaut 100 °C. Autrement dit, comme la surpression nécessaire à élever une colonne d'eau de 10 centimètres ne vaut qu'un centième d'atmosphère, l'augmentation de pression fait monter dès le début l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.

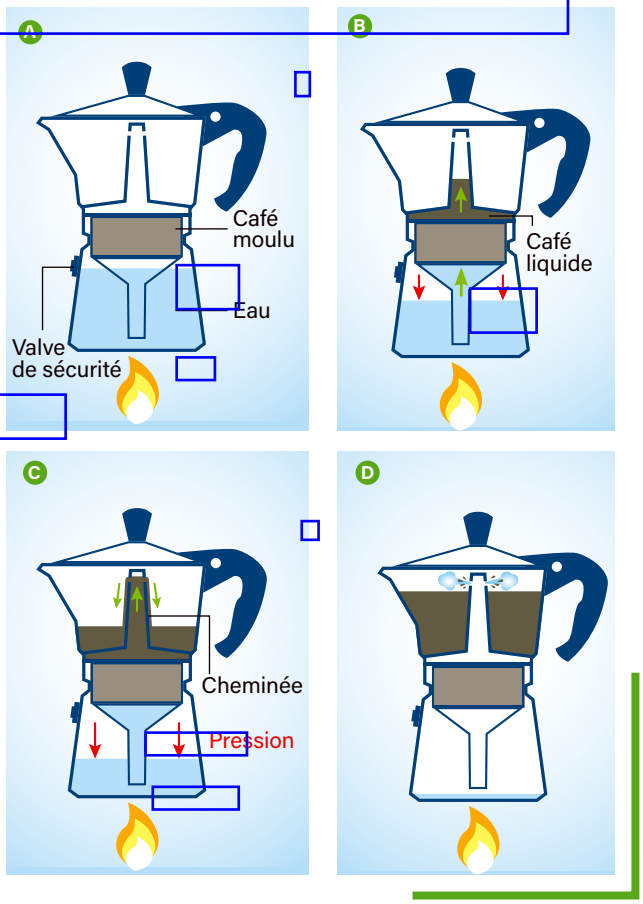
C'est ce que confirment les mesures très précises réalisées il y a une dizaine

© Illustrations de Bruno Vacaro

## QUAND L'AIR ET LA VAPEUR D'EAU POUSSENT

**Dans le réservoir inférieur d'une cafetière italienne posée sur le feu, l'eau chauffe et s'évapore en partie, et l'air s'échauffe aussi (A). La pression exercée par la vapeur d'eau et l'air augmente peu à peu. Ce faisant, elle pousse l'eau dans le panier-entonnoir qui contient le café moulu (B). Après avoir traversé la mouture, l'eau, chargée en arômes et devenue ainsi café liquide, monte dans la cheminée puis s'écoule dans la verseuse par les orifices du sommet (C), jusqu'à épuisement du réservoir inférieur (D).**




d'années par des physiciens de l'université de Trieste et des ingénieurs de la société Illy, qui ont placé des capteurs dans une Moka Express (*voir l'encadré page 90*). La première goutte de café recueillie après le filtre était typiquement à une température comprise entre 60 °C et 65 °C, quand la pression dans le réservoir était à peine plus élevée que la pression atmosphérique. La dernière goutte de café extraite était à une température de 96-98 °C, avec une pression dans le réservoir dépassant 2 bars.

### DE L'AIR CHAUD ET DE LA VAPEUR D'EAU

Soyons plus quantitatifs. Au départ, l'air enfermé dans le réservoir est à pression atmosphérique, soit 1,01 bar (ou 101 kilopascals). À température ambiante, disons 20 °C, la contribution de la vapeur d'eau à la pression est très faible: 0,023 bar; la pression de l'air sec est donc d'environ 0,99 bar.

À mesure que l'on chauffe, la température de l'air sec, dont la quantité est fixée, augmente, mais le volume qu'il occupe s'accroît aussi puisque l'eau est poussée vers la verseuse; en fin d'extraction, ce volume est multiplié par 6 environ. Ainsi, quand l'air sec avoisine une température de 100 °C, à cause de l'augmentation de volume, sa contribution à la pression totale se réduit à 0,21 bar, soit un cinquième de sa valeur initiale.

En revanche, la pression de la vapeur d'eau dans de l'air à 100% d'humidité augmente très rapidement: elle atteint 0,31 bar à 70 °C, 0,70 bar à 90 °C, 1,01 bar, comme il se doit, à 100 °C, la température d'ébullition, 1,43 bar à 110 °C et près de 2 bars à 120 °C. Ces chiffres confirment ceux mentionnés plus haut: nul besoin d'atteindre l'ébullition pour créer la surpression nécessaire à l'extraction du café.

En moyenne sur la durée de l'extraction, la température de l'eau qui traverse la mouture est de l'ordre de 80 °C. On est donc loin de l'eau bouillante. Cette température est même un peu basse par rapport à celle recommandée (90 °C ± 5 °C)

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

pour obtenir un bon expresso : un peu d'acidité est possible.

C'est pour cette raison qu'il est fortement déconseillé de mettre moins d'eau que prévu. Avec davantage d'air sec et moins d'eau à faire monter, la température moyenne de l'eau sera encore plus basse et le café ne sera pas bon. Une solution parfois recommandée est alors de remplir le réservoir avec de l'eau déjà chaude (mais non bouillante) ; la température moyenne d'extraction sera alors plus élevée. Dans tous les cas, il faut retirer la cafetière du feu dès qu'elle gargouille : les dernières gouttes, produites à des températures dépassant 95 °C, sont amères.

## BIEN CHOISIR SA MOUTURE DE CAFÉ

Comme le savent les baristas accomplis, le goût du café dépend aussi du temps d'extraction et de la qualité de la mouture. La percolation de l'eau à travers le café moulu est un processus très complexe. Au début, l'eau imbibe facilement la mouture sèche. Cette dernière est en effet constituée d'un empilement grossier de particules submillimétriques, laissant des pores et des interstices interconnectés où l'eau peut s'engouffrer. La « perméabilité » du matériau est alors relativement élevée.

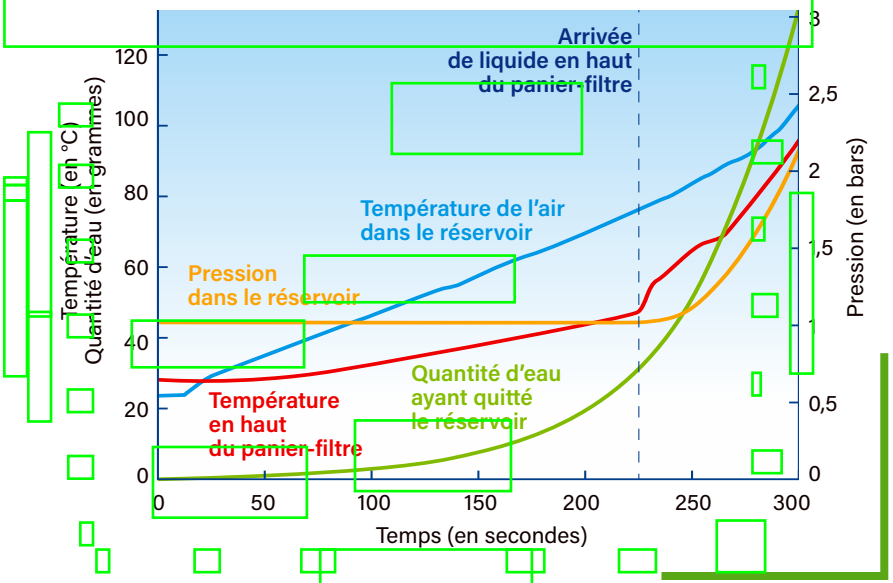
Cette grandeur représente la quantité de fluide qui peut traverser le milieu par unité de temps en fonction de la chute de pression en son sein. Sa valeur correspond ici à celle du sable très fin, et c'est pourquoi l'extraction peut débuter sans surpression notable.

Cependant, l'eau se charge progressivement en composés solubles et volatils, ce qui modifie ses propriétés rhéologiques ; en outre, les particules de café se réarrangent et gonflent à cause de la présence de polysaccharides insolubles. Il s'ensuit une chute de la perméabilité (d'un facteur 4 environ pendant la durée du processus). Pour que le liquide continue de s'écouler, il faut donc des surpressions plus élevées.

En fin de compte, avec une mouture fine (des particules de 0,3 millimètre) et non tassée, on a besoin de laisser la cafetière sur le feu 5 minutes, dont environ 2 minutes correspondent au temps d'extraction. C'est bien plus que les 30 secondes recommandées pour un expresso, mais en cohérence avec une température d'extraction plus basse. Avec une mouture plus fine ou tassée, le café obtenu risque d'être trop fort…

## LA CAFETIÈRE ITALIENNE AUSCULTÉE

**En 2009, Luciano Navarini et ses collègues, en Italie, ont publié une étude de la thermodynamique de la cafetière italienne, réalisée en équipant celle-ci de capteurs de température et de pression. Leurs mesures, dont quelques-unes sont reproduites ici, ont notamment montré que l'eau n'a pas du tout besoin de bouillir pour commencer à monter et traverser la mouture de café.**




Enfin, malgré ces bonnes pratiques, sans doute regretterez-vous que votre café, aussi délicieux soit-il, ne présente pas ou peu de mousse, comme dans un expresso ! Pourquoi ? Parce qu'il est extrait à trop basse pression (entre 1 et 2 bars).

Cette mousse a en effet pour origine le gaz carbonique naturellement présent dans les grains de café à la suite de leur torréfaction. Quand on prépare un expresso avec du café fraîchement moulu, le $CO_2$ qu'il contient se dissout, pendant l'extraction, dans de l'eau à 90 °C et à 9 bars, pression usuelle dans une machine à expresso. Mais lorsque le café jaillit du percolateur à 1 bar et se refroidit immédiatement, il devient sursaturé en $CO_2$. Comme avec l'effervescence du champagne, ce gaz forme des bulles, sans doute autour des particules microscopiques arrachées au café moulu par l'écoulement de l'eau et qui constituent des sites de nucléation. Ces particules donnent aussi la couleur caractéristique de la mousse de l'expresso.

C'est pourquoi Bialetti a équipé ses cafetières italiennes du modèle Brikka d'un dispositif à valve pressostatique qui retarde l'écoulement du café dans la verseuse tant qu'une pression seuil n'est pas atteinte. La Brikka fonctionne donc à une pression plus élevée, avec un temps de préparation augmenté, mais elle donnera aussi une mousse comme pour un véritable expresso. ■

## BIBLIOGRAPHIE

B. Folmer (dir.), **The Craft and Science of Coffee**, Elsevier, 2017.

L. Navarini *et al.*, **Experimental investigation of steam pressure coffee extraction in a stove-top coffee maker,** *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 998-1004, 2009.

W. D. King, **The physics of a stove-top espresso machine,** *American Journal of Physics*, vol. 76, pp. 558-565, 2008.

E. Illy, **L'alchimie du café,** *Pour la Science*, n° 298, pp 40-45, août 2002.

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American

# COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !




**N° 523 (Mai 21)**
réf. PL523




**N° 522 (Avril 21)**
réf. PL522



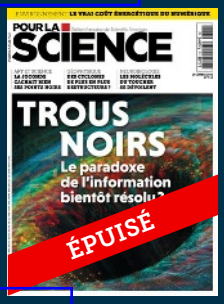

**N° 521 (Mars 21)**
réf. PL521




**N° 520 (Fév 21)**
réf. PL520




**N° 519 (Jan 21)**
réf. PL519




**N° 518 (Déc. 20)**
réf. PL518




**N° 517 (Nov. 20)**
réf. PL517



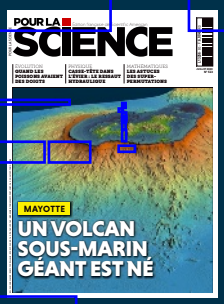

**N° 516 (Oct. 20)**
réf. PL516




**N° 515 (Sept. 20)**
réf. PL515




**N° 514 (Août 20)**
réf. PL514




**N° 513 (Juill. 20)**
réf. PL513




**N° 512 (Juin 20)**
réf. PL512

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr

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

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

1e réf. 0 1 x 9,40 € = 9,40 €
2e réf. ..... x 9,40 € = ..... €
3e réf. ..... x 9,40 € = ..... €
4e réf. ..... x 9,40 € = ..... €
5e réf. ..... x 9,40 € = ..... €
6e réf. ..... x 9,40 € = ..... €

**TOTAL À RÉGLER ..... €**

## 2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....
Courriel : .....
*J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON

## 3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

**Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

**Groupe Pour la Science** – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement.
Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

L'AUTEUR



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

# LA CURIEUSE RENCONTRE DE L'OURSIN ET DU PANCRÉAS

**Si l'oursin est dépourvu de pancréas, une population de neurones de sa larve ressemble étrangement à nos cellules pancréatiques… Cette découverte pourrait révolutionner l'embryologie.**

En regardant le corps hérissé de l'oursin, difficile d'imaginer que cet échinoderme est l'un des animaux de prédilection des biologistes du développement. Et pourtant, l'animal présente toutes les qualités requises : la fécondation de l'œuf, externe, est facile à réaliser en laboratoire. De plus, son embryogenèse est rapide : l'œuf fécondé devient une larve en quelques jours. Enfin et surtout, cette larve, nommée « *pluteus* », est transparente : c'est un minuscule organisme planctonique, facile à manipuler et à observer. Dès la fin du XIXe siècle, l'oursin est ainsi devenu un animal modèle clé en biologie du développement. Et c'est encore lui qui, aujourd'hui, pourrait modifier considérablement notre vision de l'embryologie.

Cette vision, l'oursin lui-même a grandement contribué à la forger. En effet, après avoir découvert l'intérêt exceptionnel de cet animal dans les années 1870, l'école allemande d'embryologie a esquissé, en l'étudiant, une feuille de route pour l'étude du développement, laquelle est toujours d'actualité. En cinquante ans, Oscar Hertwig, Hans Driesch, puis Hans Spemann et Hilde Mangold ont décrit avec précision la fécondation, puis l'indépendance des premières cellules de l'embryon et, enfin, l'existence d'une zone de l'embryon qui orchestre son organisation.

Le cahier des charges des embryologistes était alors écrit : suivre chaque lignée cellulaire de l'embryon (la succession des divisions à partir d'une cellule mère) et comprendre comment ces lignées s'organisent en feuillets (décrits dès le XVIIIe siècle chez le poulet), puis en tissus et organes. Et, aujourd'hui encore, si les outils ont changé, l'objectif est resté le même : depuis la fin du XXe siècle, grâce aux avancées en microscopie et biologie moléculaire, les biologistes du développement décodent les mécanismes moléculaires qui contrôlent ce processus chez des organismes variés. Or tout récemment, en étudiant l'expression des gènes





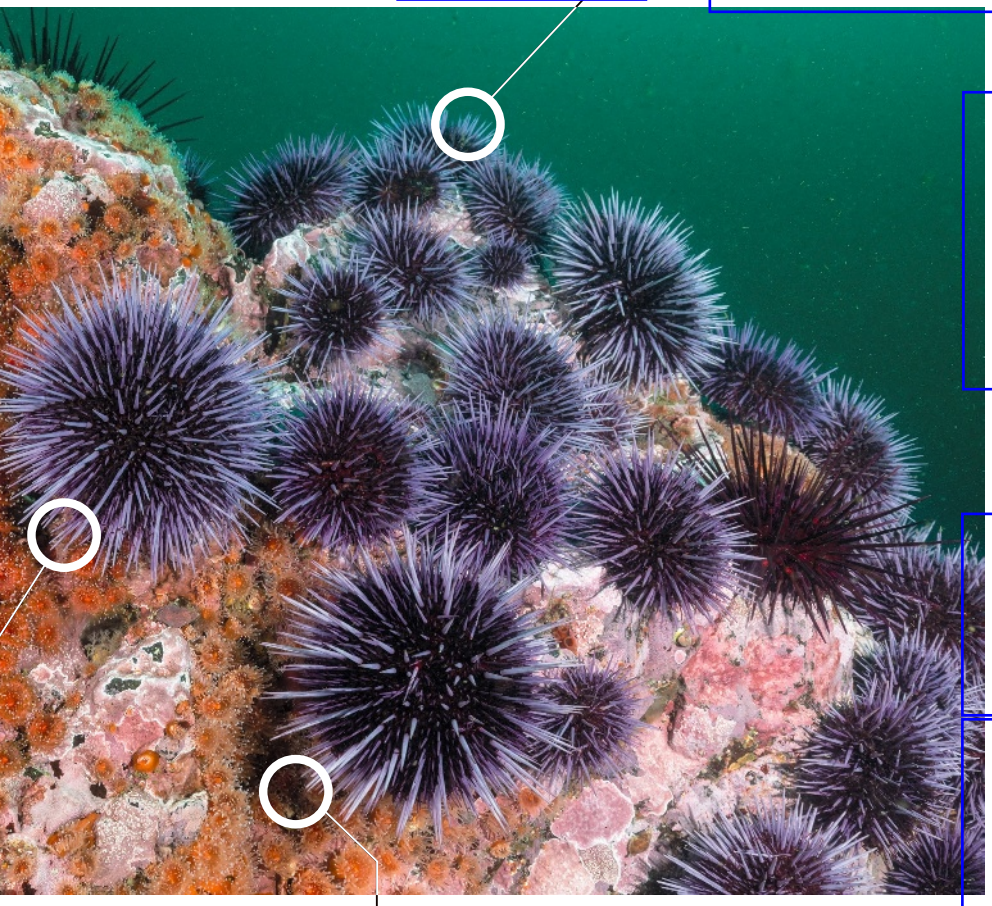
Les oursins pourpres vivent sur la côte ouest de l'Amérique du Nord, où ils peuplent le fond marin sous la zone de balancement des marées, dans les forêts de kelp.

Larve : © Shutterstock.com/Rattiya Thongdumhyu

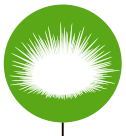
Hervé Le Guyader a récemment publié : **Biodiversité, le pari de l'espoir,** (Le Pommier, 2020).

La larve *pluteus* des échinodermes, dont font partie les oursins, est un petit organisme planctonique transparent dont l'anatomie est bien connue, ce qui autorise la reconnaissance des cellules à l'aide de sondes fluorescentes. L'oursin se métamorphose dans la larve et s'en libère en la digérant.

Nommée « test », l'enveloppe des oursins est une structure minérale constituée de plaques de calcite, une forme particulière de cristallisation du carbonate de calcium. Il en est de même pour leurs piquants, les « radioles ».



Les oursins se déplacent sur les fonds marins sur leurs radioles, articulés à leur base.



**Oursin pourpre**
***(Strongylocentrotus purpuratus)***
Taille : 5 à 10 cm (sans les piquants)
Taille de la larve *pluteus* :
env. 500 µm de long

© Gettyimages/Brent Durand

## EN CHIFFRES

**16 500**

Le génome de l'oursin pourpre compte 814 millions de paires de bases et 23 300 gènes, dont 16 500 s'expriment au cours du développement. Depuis les années 2000, des biologistes retracent les réseaux de régulation que construisent ces gènes activés.

**19 699**

Récemment, l'équipe de Maria Arnone a étudié les profils d'expression des gènes de 19 699 cellules isolées à partir de la larve de l'oursin pourpre, le *pluteus*. Elle a par ailleurs identifié chacun des 15 578 gènes exprimés. Ces profils d'expression ont révélé que ces cellules ne forment que 21 groupes différents, dont 12 rassemblent des neurones.

**520**
**MILLIONS D'ANNÉES**

L'ancêtre hypothétique commun des échinodermes et des chordés, qui comprennent les vertébrés, vivait probablement il y a 520 millions d'années, soit quelque 10 millions d'années après l'explosion cambrienne, l'apparition, en une dizaine de millions d'années, de la plupart des embranchements des organismes pluricellulaires.

de chaque cellule du *pluteus* de l'oursin pourpre, Maria Arnone, de la station zoologique Anton-Dohrn, à Naples, et ses collègues, ont montré que certains neurones de la larve sont étonnamment similaires à des cellules pancréatiques des vertébrés. L'explication de ce phénomène pourrait donner une toute nouvelle dimension à l'embryogenèse et bouleverser la feuille de route des embryologistes.

## DES RÉSEAUX DE GÈNES

Pour comprendre cette découverte, un concept est essentiel: celui de réseau de régulation génétique, ou GRN, proposé sous l'impulsion décisive d'Eric Davidson, à l'institut de technologie de Californie, à Pasadena, dans les années 2000. Ce dernier a constaté que l'embryologie d'un organisme est, à chaque instant, contrôlée par des changements progressifs de l'état général de la régulation génétique des différentes régions de l'organisme en développement.

À chaque instant, le profil d'expression des gènes dans chaque région change sous l'impulsion de régulations issues d'autres régions, régulations elles-mêmes produites par l'expression de gènes dans d'autres régions encore. Comme les gènes mis en cause se régulent les uns les autres et comme chaque gène régulateur répond à de multiples facteurs et régule de multiples gènes, la carte complète de l'ensemble de ces interactions a la forme d'un réseau (*voir l'encadré page 94*). Eric Davidson s'est alors attelé à décrire les réseaux génétiques de régulation qui président au développement de l'oursin pourpre et il a eu l'idée géniale de les présenter comme des circuits logiques, en se focalisant sur les interactions activatrices ou inhibitrices des gènes.

Eric Davidson a ainsi fait émerger une structuration *a priori* non évidente, valide pour tout embryon. Les GRN sont modulaires et hiérarchiques: les modules qui contrôlent les étapes initiales du développement sont au sommet de cette hiérarchie, ceux qui contrôlent les processus intermédiaires de la subdivision spatiale

sont au milieu, et ceux qui contrôlent les détails de la morphogenèse sont à la périphérie. Corrélativement, les modules des GRN diffèrent dans leur labilité évolutive. Les composants les plus permanents – appelés «noyaux» – structurent les interactions de régulation les plus conservées. Ce sont eux qui opèrent pendant la phase initiale du développement, par exemple la régionalisation de l'embryon. Une organisation qui, pour Eric Davidson et nombre de biologistes du développement à sa suite, suggère que la conservation de la structure des noyaux des GRN développementaux est la cause directe de la stabilité des plans des animaux depuis le début du Cambrien, il y a 520 millions d'années.

Le séquençage complet du génome de l'oursin pourpre, en 2006, a été une étape capitale. Toutefois, une question subsistait: comment de tels modules logiques pouvaient-ils se transformer? Veronica Hinman, ancienne collaboratrice d'Eric Davidson actuellement à l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues ont apporté un élément de réponse en 2020 en comparant les GRN de deux animaux proches, l'oursin pourpre et l'étoile de mer *Patiria miniata*. Dans un module parmi les plus permanents, ils ont mis en évidence qu'un sous-module, postulé identique chez ces deux échinodermes, présente l'activation d'un gène supplémentaire chez l'étoile de mer, ce qui mène à une possibilité de commutation entre deux modes stables. En d'autres termes, un même module pourrait fonctionner suivant plusieurs modes. La stabilité des GRN permettrait ainsi d'accepter de nouveaux gènes, et les multiples modes de fonctionnement d'amener de la nouveauté. De plus, l'équipe a montré que des GRN présentent des motifs très conservés dans le monde animal, ce qui corrobore cette hypothèse (*voir l'encadré ci-contre*).

## LA LARVE DE L'OURSIN CELLULE PAR CELLULE

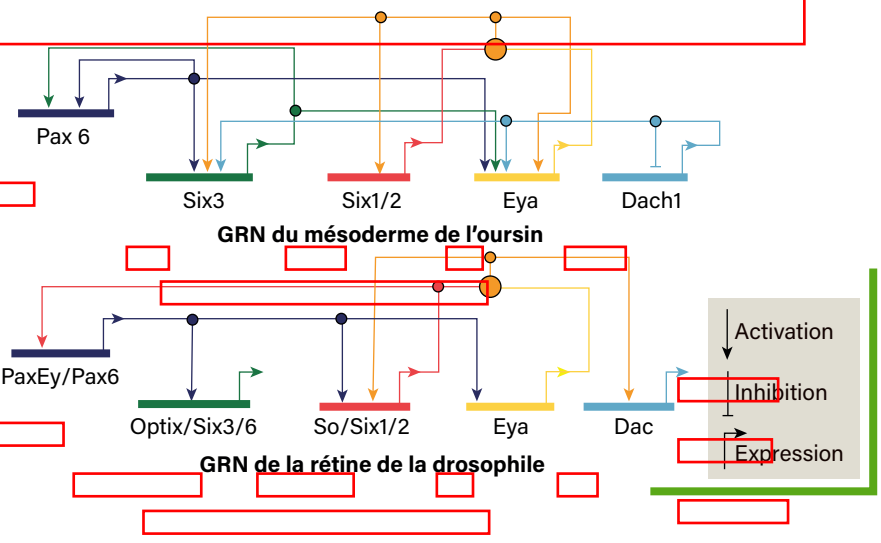
C'est dans ce contexte que l'équipe de Maria Arnone a réalisé une prouesse technique. Alors qu'Eric Davidson et Veronica Hinman travaillaient sur des tissus ou leurs ébauches, c'est-à-dire un ensemble de cellules qui ne présentent pas nécessairement les mêmes différenciations, elle a déterminé l'ensemble des gènes exprimés sur quelque 20000 cellules isolées du *pluteus* de l'oursin pourpre. En fonction de leurs profils d'expression, elle a montré que ces cellules se répartissent en seulement 21 groupes, chacun caractérisé par un GRN propre, que l'équipe est en train de préciser. Néanmoins, une curiosité est déjà apparue.

La moitié de ces groupes concernent des cellules nerveuses, avec leurs propres spécificités. Or, parmi ces neurones, un groupe présente un GRN identique à celui des cellules qui sécrètent l'insuline dans le pancréas des vertébrés, les cellules β. Les échinodermes étant un groupe frère des chordés, dont font partie les vertébrés, une telle fonction endocrine est forcément héritée de leur ancêtre commun. Problème: les cellules β pancréatiques ne sont pas d'origine nerveuse! Or dans l'arbre du vivant, les neurones sont apparus d'abord, comme en atteste leur présence chez des organismes très éloignés. Les cellules digestives exprimant l'insuline, précurseurs des cellules β, sont arrivées plus tard, peut-être selon le scénario suivant, que propose l'équipe de Maria Arnone: à un moment donné, les précurseurs des cellules β ont «adopté» le GRN d'une cellule nerveuse préexistante, comme si une cellule embryonnaire était capable de redéployer le GRN d'une autre cellule.

Si cette hypothèse se confirme, suivre l'histoire des lignées cellulaires et des filiations d'organes et de tissus ne suffira plus pour comprendre le développement. Une découverte qui pourrait avoir un impact aussi fort que celle du transfert horizontal de gènes d'un organisme à un autre. ■

## DES CIRCUITS LOGIQUES TRÈS SIMILAIRES

Pour le biologiste américain Eric Davidson, le réseau de régulation des gènes ou GRN, c'est-à-dire la façon dont l'activation de chacun agit sur les autres au fil du développement, peut être vu comme un circuit logique constitué de modules élémentaires que l'évolution redéploie, comme un électronicien modifierait l'agencement des modules d'un circuit électronique. L'équipe de Veronica Hinman a conforté cette idée en montrant que le réseau de gènes en action dans des cellules qui participent à la spécification d'un feuillet de l'embryon de l'oursin pourpre, le mésoderme, est très semblable à celui de la différenciation de la rétine chez la drosophile.




## BIBLIOGRAPHIE

P. Paganos *et al.*, **Single cell RNA sequencing of the *Strongylocentrotus purpuratus* larva reveals the blueprint of major cell types and nervous system of a non-chordate deuterostome**, *Biorxiv*, 2021.

G. A. Cary *et al.*, **Systematic comparison of sea urchin and sea star developmental gene regulatory networks explains how novelty is incorporated in early development**, *Nat. Commun.*, vol. 11, article 6235, 2020.

E. V. Rothenberg, **Eric Davidson : steps to a gene regulatory network for development**, *Dev. Biol.*, vol. 412, pp. S7-S19, 2016.

D. Erwin et E. Davidson, **The evolution of hierarchical gene regulatory networks**, *Nat. Rev. Genet.*, vol. 10, pp. 141-148, 2009.

© Pour la Science, d'après G. A. Cary et al., Nat. Commun., vol. 11, article 6235, 2020

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American
# HORS-SÉRIE

## COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !




**N° 111 (mai. 21)**
réf. DO111




**N° 110 (fév. 21)**
réf. DO110




**N° 109 (nov. 20)**
réf. DO109




**N° 108 (sept. 20)**
réf. DO108




**N° 107 (mai 20)**
réf. DO107




**N° 106 (févr. 20)**
réf. DO106




**N° 105 (nov. 19)**
réf. DO105




**N° 104 (juil. 19)**
réf. DO104




**N° 103 (avr. 19)**
réf. DO103




**N° 102 (fév. 19)**
réf. DO102




**N° 101 (nov. 18)**
réf. DO101




**N° 100 (août 18)**
réf. DO100

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR**

**À renvoyer accompagné de votre règlement à :**
Service abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

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

1re réf. 0 1 x 10,40 € = 1 0 4 0 €
2e réf. ..... x 10,40 € = ..... €
3e réf. ..... x 10,40 € = ..... €
4e réf. ..... x 10,40 € = ..... €
5e réf. ..... x 10,40 € = ..... €
6e réf. ..... x 10,40 € = ..... €

**TOTAL À RÉGLER** ..... €

Offre valable jusqu'au 31/12/21 en France Métropolitaine.
Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

### 2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....
*J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON

### 3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

**Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

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

**Groupe Pour la Science** – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

L'AUTEUR



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

# COMMENT POCHER DES ŒUFS

**Des expériences confirment ce que préconisent de vieux livres de cuisine et montrent de possibles améliorations des pratiques.**



Le pochage réussi des œufs est une opération délicate, facilitée par l'ajout d'un acide – vinaigre, jus de citron, etc.

Le pochage des œufs s'impose pour accompagner des asperges, agrémentées d'une sauce hollandaise. Notons d'abord que, contrairement à une idée reçue, on ne doit pas sursaler l'eau de cuisson: l'asperge étant formée de structures parallèles, entre lesquelles l'eau salée s'insère par capillarité, son goût s'en ressent. Cuisons donc les asperges dans de l'eau raisonnablement salée.

Similairement, pour le pochage des œufs, il a été écrit qu'il fallait ajouter du sel dans l'eau de cuisson pour que les œufs déposés dans l'eau bouillante forment une poche coagulée, au lieu que le blanc se disperse en filaments. Nous avons comparé, dans notre séminaire de gastronomie moléculaire, des œufs d'une même boîte (donc du même âge) pochés soit dans de l'eau pure, soit dans de l'eau salée (peu ou beaucoup), soit dans du vinaigre. La différence est spectaculaire, et c'est le vinaigre qui donne les meilleurs résultats... Avec des différences de goût: les œufs pochés dans l'eau salée seront salés, et les œufs cuits dans de l'eau vinaigrée prendront une saveur acidulée. Évidemment, nous saurons cuire dans de l'eau à la fois salée et vinaigrée, pour avoir des œufs pochés à la fois acidulés et bien salés.

## EAU VINAIGRÉE OU EAU CITRONNÉE ?

Une recette, dans un livre de cuisine de 1899, indique les étapes du pochage: «Faire bouillir une quantité relative d'eau salée et acidulée de jus de citron ou à défaut du bon vinaigre. Plonger les œufs frais dans l'eau bouillante; les ressortir après trente secondes; les casser alors un à un en les faisant tomber en une seule masse dans l'eau acidulée en ébullition. Retirer la casserole et les laisser ainsi pendant quatre minutes. Les sortir à l'aide d'une écumoire et les plonger dans l'eau fraîche. Les parer avec le couteau ou avec l'emporte-pièce.» Que faut-il en penser?

Nous avons testé deux idées, l'utilisation de citron, d'une part, et le prépochage, d'autre part. Oui, les œufs pochés dans l'eau citronnée sont plus blancs que dans de l'eau vinaigrée, si le vinaigre est du vinaigre de vin, teinté des composés phénoliques du raisin. Oui, les œufs pochent mieux dans l'eau citronnée que dans l'eau vinaigrée, et cela nous a conduits à mesurer le pH de l'eau de cuisson: il était inférieur pour l'eau citronnée et, en tout cas, inférieur au «point isoélectrique» (pH pour lequel la charge électrique totale des molécules de protéines est nulle) qui entraîne la dénaturation des protéines et leur coagulation.

Enfin, oui, le prépochage de l'œuf, entier et dans sa coquille, a donné de bons résultats, à condition de réduire d'autant le pochage ultérieur.

Reste la hollandaise, à propos de laquelle il a été écrit: «Divisez en petits morceaux trois cuillerées à bouche de beurre fin, mettez-les dans une casserole de haute forme avec 5 jaunes d'œufs, 2 cuillerées à bouche d'eau froide, le jus d'un citron. Fouettez sans cesser, à feu doux. Une dizaine de minutes après, la sauce aura acquis le double de son volume primitif, sera devenue crémeuse.» Nous n'avons pas obtenu le doublement de volume, mais une notable augmentation et cela doit nous amener à réfléchir à des façons de faire bien mieux foisonner.

Nous avons maintenant les bases pour produire un merveilleux plat d'asperges! ■

## LA RECETTE

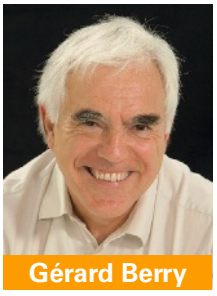
**❶ Éplucher les asperges, couper l'extrémité inférieure, puis les placer verticalement dans un bocal en verre thermorésistant. Placer le bocal dans une casserole avec 10 grammes de sel par litre d'eau ; le niveau de l'eau ne doit pas atteindre les têtes. Faire bouillir pendant 5 à 15 minutes selon le diamètre des asperges, leur fraîcheur, la variété, etc. (vérifier à la pointe du couteau que les asperges sont cuites, mais croquantes).**
**❷ Mettre de l'eau dans une large poêle, puis ajouter du gros sel et le jus d'un citron. Porter à ébullition, puis réduire le feu pour n'avoir qu'un frémissement soutenu. Placer les œufs à pocher dans leur coquille pendant environ 30 secondes. Les ressortir, puis les casser dans l'eau citronnée et salée ; les cuire pendant 2 minutes. Les sortir à l'écumoire, les égoutter et les poser sur les asperges.**
**❸ Pour la sauce hollandaise, mettre dans une petite casserole 3 jaunes d'œuf, le jus d'un citron et 5 cuillerées à soupe d'eau ou de bon vin blanc. Mettre la casserole sur feu modéré, et fouetter vivement jusqu'à obtenir une belle mousse épaisse. Ajouter alors en fouettant 100 grammes de beurre tiédi, du sel et du poivre.**
**❹ Napper les œufs de cette sauce et servir.**

© Shutterstock.com/Gaak


J.-P. Delahaye

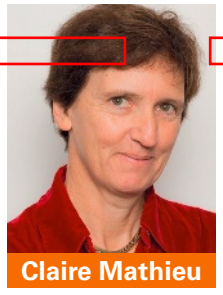

Ivar Ekeland


Nathalie Besson


Gérard Berry


Isabelle Drouet


Nicolas Gauvrit

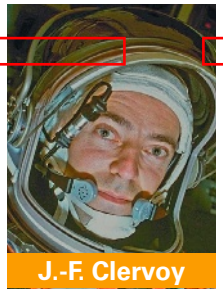

Claire Mathieu

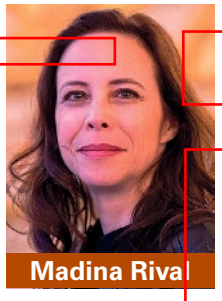

Etienne Klein

# Time World 2021 PARIS


Stuart Vyse


Roland Lehoucq


J.-F. Clervoy


Madina Rival

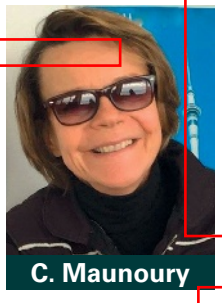
## Congrès mondial sur le HASARD


François Taddei


Juliette Mignot

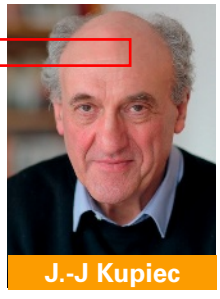
**1ER, 2, 3 JUILLET au Conservatoire national des arts et métiers**

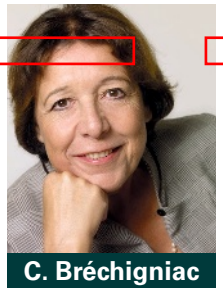

Philippe Charlier


C. Maunoury

Programme et billetterie
**timeworldevent.com**

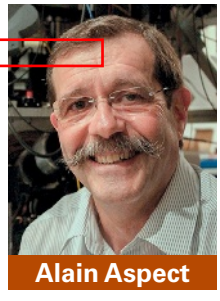

Kinga Morsanyi

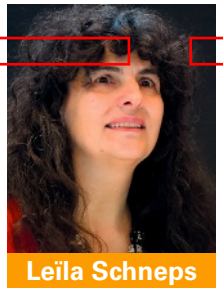

J.-J Kupiec


C. Bréchigniac


M.Abolgassemi


Hubert Reeves

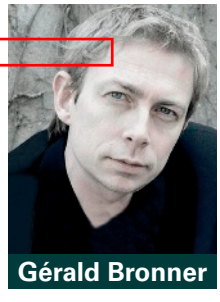

Alain Aspect


Leïla Schneps


François Forget

**90 CONFÉRENCES**
**6 TABLES RONDES**
**EXPOSITION**
**DÉDICACES**
**SPECTACLES**


David Elbaz


Gérald Bronner

Sous le haut patronage

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
*Liberté Égalité Fraternité*

Soutenu par la chaîne YouTube
ideas in science

En partenariat avec
POUR LA SCIENCE

Une co-production
Innovaxiom
le cnam

# PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

## p.88 EXPRESSO

Pas d'expresso sans mousse ! Et pas de mousse sans $CO_2$... La mousse de l'expresso a pour origine le gaz carbonique présent dans les grains de café à la suite de leur torréfaction. Quand on prépare un expresso avec du café fraîchement moulu, le $CO_2$ qu'il contient se dissout dans de l'eau à 90 °C et à 9 bars. Mais lorsque le café jaillit du percolateur à 1 bar et se refroidit immédiatement, il devient sursaturé en $CO_2$, qui forme des bulles.

## p.7 160 MILLIARDS

**Évalué à environ 1 milliard d'euros dans les années 1980, le coût des invasions biologiques aurait dépassé les 160 milliards d'euros en 2017, soit 20 fois les budgets combinés de l'OMS et du secrétariat de l'ONU cette même année.**

## p.20

Comprendre les interactions des humains et non-humains, imaginer le vivre-ensemble, se passer de l'économie sont des défis posés aux sciences de la durabilité

**CATHERINE AUBERTIN** économiste de l'environnement à l'IRD

## p.92 PLUTEUS

La larve *pluteus* des échinodermes, dont font partie les oursins, est un petit organisme planctonique transparent d'environ 0,5 millimètre de long. La larve se métamorphose en oursin, lequel s'en libère... en digérant ce qu'il en reste.

## p.38 SUPERMAN'S CRAWL

**L'accès à la cavité Dinaledi, en Afrique du Sud, constitue une énigme. Il implique de franchir le « Superman's Crawl », un boyau si étroit – moins de 25 centimètres – que seuls des spéléologues petits et minces peuvent prétendre y ramper sans rester bloqués. Pourtant, c'est dans cette cavité que l'on a retrouvé plusieurs fossiles d'*Homo naledi*, des humains qui vivaient il y a 300 000 ans.**

## p.72 GRANA FINA

Au XVI^e^ siècle, les conquistadors ont donné ce nom à des grains desséchés noirs ou rougeâtres produits au Mexique et les ont commercialisés en Europe et en Asie pour leur pouvoir tinctorial rouge. Graine ou insecte ? Les Européens n'ont levé le doute qu'au XVIII^e^ siècle : il s'agissait d'une cochenille, issue d'une longue sélection à l'époque précolombienne.

## p.46 368 MILLIONS

**En 2019, la production mondiale de plastique a atteint 368 millions de tonnes, selon l'organisme Plastics Europe, qui rassemble les fabricants européens de plastique, contre 2 millions de tonnes en 1950. Environ 40 % de ces plastiques ont été utilisés pour des emballages.**

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – juin 2021 – N° d'édition : M0770524-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 254078 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

# Diplômes d'Université de l'Observatoire de Paris

| EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS | | LUMIERES SUR L'UNIVERS |
|---|---|---|
| Licence 1 | **Niveau** | Licence 1 à Master 1 |
| Formation en présentiel ou à distance<br>Cours magistraux filmés et retransmis en direct ou en différé | **Suivi** | Formation en ligne<br>Tutorat personnel et individualisé<br>Cours thématiques avec de nombreux exercices |
| Acquérir un panorama des connaissances actuelles en astronomie et astrophysique auprès d'astronomes professionnel·le·s | **Objectifs** | Acquérir des bases solides en astrophysique à travers les parcours thématiques proposés<br><br>Se spécialiser grâce aux exercices suivis et corrigés à distance par un·e astronome professionnel·le |
| Cours et TD (Mécanique Céleste, Ondes et Instruments, Soleil, Cosmologie, Galaxies etc.)<br><br>Stage pratique d'une semaine à l'Observatoire de Meudon (optionnel et sous conditions)<br><br>Stage d'observation à l'Observatoire de Haute Provence (optionnel et sous conditions) | **Contenu** | Des parcours thématiques adaptés à tous :<br><br>• Des étoiles aux planètes (L1-L2)<br>• Cosmologie et Galaxies (L2)<br>• Mécanique céleste (L3)<br>• Sciences planétaires (L3)<br>• Fondamentaux pour l'astrophysique (L3)<br>• Fenêtres sur L'Univers (M1)<br>• Instrumentation (M1)<br><br>Plusieurs centaines d'exercices corrigés individuellement |
| http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/ | **Pages Web** | http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/ |
| contact.duecu@obspm.fr | **Contact** | contact.dulu@obspm.fr |

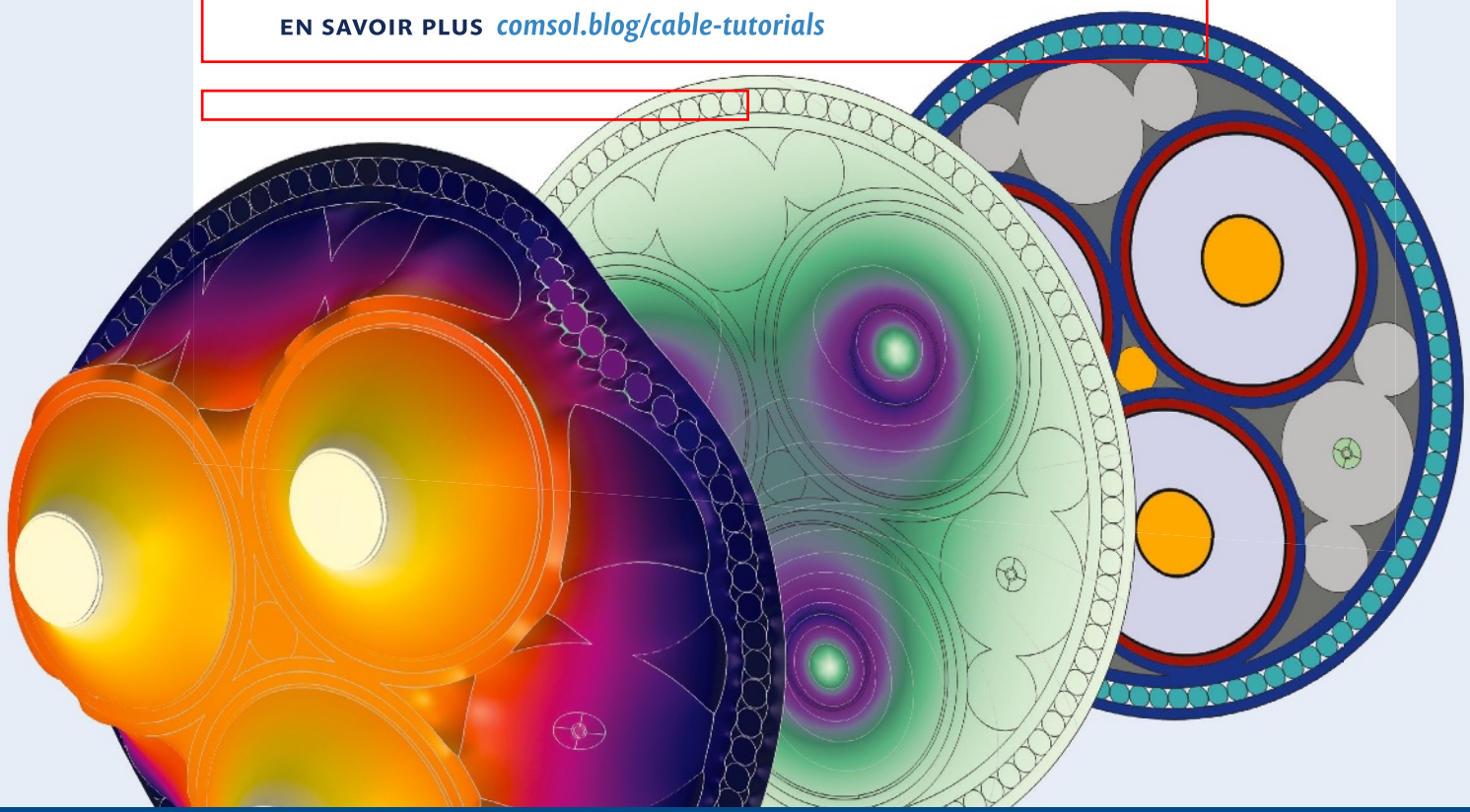
**Dates limites d'inscription**
5 septembre 2021
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

ÉTUDE DE CAS

# Concevoir avec pertinence grâce aux simulations électromagnétiques.

Dans la conception des câbles, il est important de tenir compte des effets capacitifs, inductifs et thermiques. Par exemple, différents types de contact entraînent des accumulations et des pertes de courant différentes. De même, le conducteur de phase et la torsion du blindage affectent la distribution du courant dans le câble. Sachant cela, vous prendrez les meilleures décisions de conception. C'est là qu'interviennent les simulations électromagnétiques.

**EN SAVOIR PLUS** *comsol.blog/cable-tutorials*



COMSOL

**Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.**