

EMBOUTEILLAGES : est-on toujours dans la mauvaise file ?

# POUR LA SCIENCE

Mai 2012 - n° 415

www.pourlascience.fr

## Les virus géants

### Une nouvelle forme de vie ?

### Gravitation quantique

Une étape franchie en 2D

### L'avenir du chocolat

La culture du cacaoyer  
est-elle menacée ?

### L'Antarctique

Terre promise  
de la paléontologie

M 0267 445 F 620 6

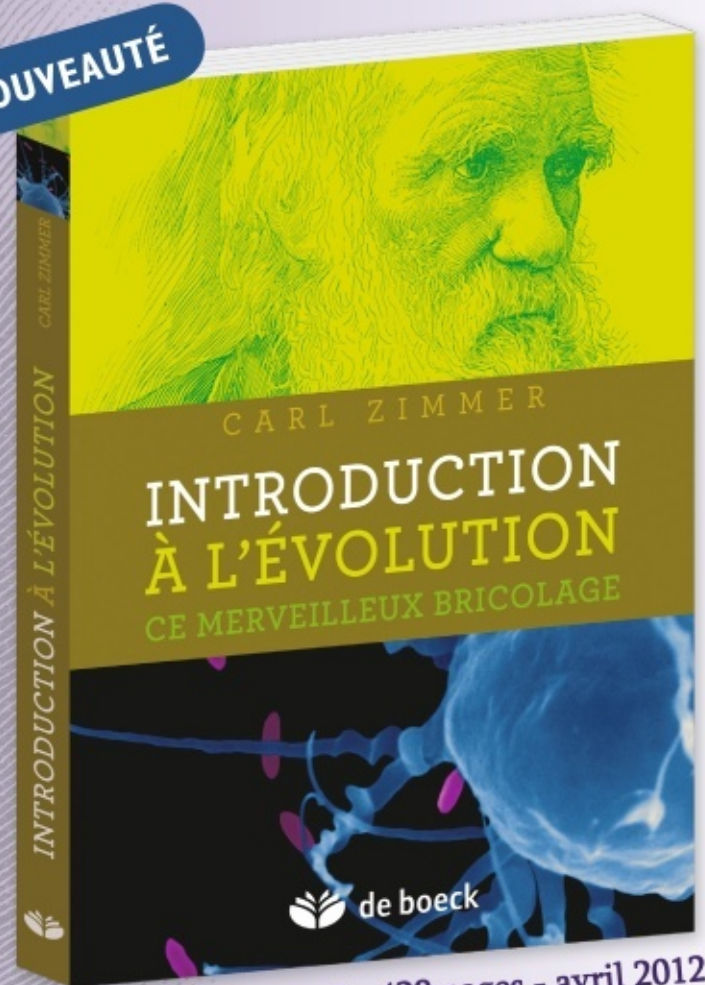


Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €  
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF.

# INTRODUCTION À L'ÉVOLUTION

CE MERVEILLEUX BRICOLAGE  
CARL ZIMMER

NOUVEAUTÉ



47 € - 428 pages - avril 2012

L'évolution est davantage qu'une théorie : c'est une façon de comprendre le monde.

Cet ouvrage retrace les grandes lignes de la science de l'évolution, depuis les pré-darwiniens jusqu'aux derniers développements en génétique et en médecine évolutionniste.

L'étude des phénomènes du monde vivant, tels que la sélection naturelle, l'évolution et la disparition des espèces, n'est pas un champ réservé aux seuls chercheurs. En effet, les implications de ces phénomènes sur notre existence sont nombreuses et colossales.

Un livre abondamment illustré qui offre une introduction claire et complète à l'évolution.



En librairie et sur [www.deboeck.com](http://www.deboeck.com)



de boeck

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06  
Standard : Tel. 01 55 42 84 00

**Groupe POUR LA SCIENCE**

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

**Pour la Science**

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,  
Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

**Dossiers Pour la Science**

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

**Cerveau & Psycho**

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

**L'Essentiel Cerveau & Psycho**

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

Sylvie Sobelmon, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élie Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Xavier Argout,  
Michel Barel, Xavier Delfosse, Barbara Demeneix,  
Anthony Hillaret, Vaughn Iverson, Claire Lanaud, Anne Masé,  
Lydie Morel, Patrick Peter, Christophe Pichon,  
Daniel Tacquenot, Angela Taddei, Richard Taillet.

**PUBLICITÉ France**

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja  
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

**SERVICE ABONNEMENTS**

Ginette Bouffé. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : [abonnements@pourlascience.fr](mailto:abonnements@pourlascience.fr)

Adresse postale :

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

**DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE**

Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 22 41

Canada : Edipresse, 1000, boul. de l'Université, 10e étage,

Québec, H3N 1V3 Canada.

Suisse : Servidiv, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Crevelle, 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin, 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor in chief: Mariette DiChristina. Editors: Ricky Rus-  
ting, Philip Yam, Tony Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti,  
Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong.  
President : Steven L. Hinchcombe. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou  
francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents conte-  
nus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific Ameri-  
can », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées  
par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adop-  
tation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom  
commercial « Scientific American » sont la propriété de Scien-  
tific American, Inc.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de repro-  
duire 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).



## Quelle dimension ?

Edwin Abbott (1838-1926) a publié, en 1884, un conte mathé-  
matique et une allégorie, *Flatland : une aventure à plusieurs dimensions*. On y suit le héros, le Carré, dans un monde plat  
peuplé de figures géométriques, droites, triangles, carrés et  
autres polygones, qui vivent sur cette immense feuille. La troisième dimen-  
sion, l'altitude, n'existe pas. Ce monde bidimensionnel est le cadre d'une  
satire de la société victorienne. Mais le héros explore également les uni-  
vers présentant d'autres dimensions. Ainsi, un jour, le Carré se retrouve  
en présence de la Sphère, et toutes ses croyances, tous ses repères  
sont ébranlés. Il existerait une troisième dimension de l'espace ! Et  
pourquoi pas d'autres dimensions encore ?

Faisant le chemin inverse, par la pensée, le calcul, la modélisation,  
mais aussi l'expérience, les physiciens oublient l'espace à trois dimen-  
sions, pour tenter de réconcilier, dans un nouveau *Flatland*, les deux théo-  
ries qui restent incompatibles aujourd'hui : la physique quantique, qui  
s'applique à l'infiniment petit, et la relativité générale à l'infiniment grand.  
La théorie unificatrice – la théorie de la gravitation quantique – reste le  
caal des physiciens, qui s'en approchent à deux dimensions (voir *La  
gravitation quantique à deux dimensions*, page 22).

## Envisager le monde sous diverses facettes.

Réduisons encore le nombre de dimensions et intéressons-nous  
aux automobilistes bloqués sur une file dans les embouteillages. Ne  
sont-ils pas confrontés aux affres d'un monde à une dimension, le *Line-  
land* envisagé par Abbott ? Ils sont toujours persuadés que leur file est  
plus lente que les autres. Est-ce la réalité, ou sont-ils victimes d'une illu-  
sion que n'importe quelle évaluation chiffrée pourrait démontrer ? Bien  
souvent, nous serions victimes d'un biais psychologique : nous rete-  
nons davantage les circonstances où nous n'avons pas de chance (nous  
sommes bloqués dans la mauvaise file), alors que nous oublions vite  
les circonstances heureuses, voire nous ne les remarquons même  
pas (voir *La malédiction de la mauvaise file*, page 84).

Envisager le monde sous diverses facettes, ne pas se laisser enfer-  
mer dans ces certitudes. C'est sans doute cela aussi que suggère *Flat-  
land*. C'est le moteur intellectuel des scientifiques (entre autres), celui  
qui leur permet de ne pas passer à côté d'une découverte. C'est ainsi qu'ils  
ont mis en évidence des virus géants. Non seulement ils existent bel et  
bien, mais ils seraient beaucoup plus autonomes pour leur reproduction  
qu'admis jusqu'à présent (voir *Les virus géants : une nouvelle forme de  
vie ?*, page 21). Auraient-ils un équivalent à deux dimensions ?

1 **ÉDITO**4 **BLOC-NOTES**

Didier Nardon

## Actualités

6 La conjecture de fibration virtuelle démontrée

7 Un ptérosaure fossilisé avec son prédateur



9 L'ingénieuse catapulte des fougères

10 Obésité, diabète et perturbateurs endocriniens : et bien d'autres sujets.

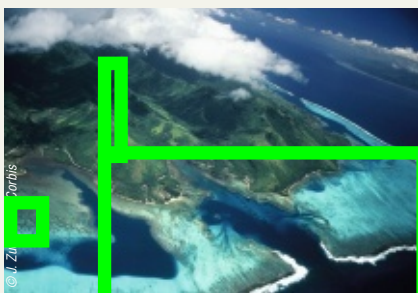
13 **ON EN REPARLE**

## Opinions

14 **POINT DE VUE**

Aires marines protégées... sur le papier

Joachim Claudet

15 **ÉCONOMIE**

La fiscalité sur les très hauts revenus

Alain Tremmoy

18 **VRAI OU FAUX**

Les épipharms rendent-ils plus fort ?

Jean-Marie Bourre

20 **COURRIER DES LECTEURS**

## À LA UNE

DOSSIER VIRUSLOGIE

21 **Les virus géants : une nouvelle forme de vie ?**22 **Les virus géants**

James Van Etten

La découverte récente de virus plus gros que certaines bactéries bouleverse notre conception de la nature des virus et de l'histoire de la vie.

30 **Les virus géants, vestiges d'organismes cellulaires ?**

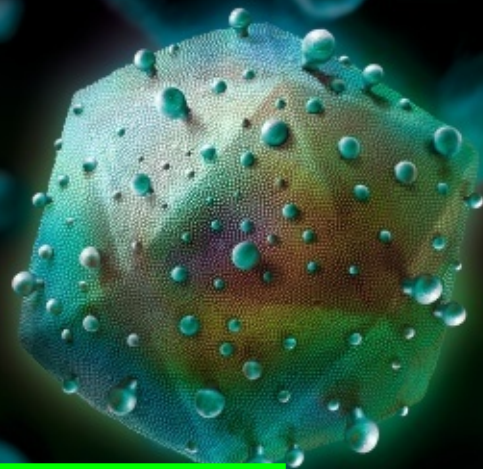
Jean-Michel Claverie et Chantal Abergel

Les virus géants tels que Mimivirus et Megavirus constituent des microbes d'un type nouveau. Ils ne se répliquent pas comme les virus classiques, en prenant le contrôle du noyau de la cellule hôte.

34 **La diversité des virus aquatiques**

Stéphane Jacquet et Caroline Denecker

Abondants et variés – on n'en connaît sans doute qu'une infime partie –, les virus aquatiques sont des acteurs clés des écosystèmes marins et d'eau douce.

42 **PALÉONTOLOGIE**  
**L'Antarctique, terre promise des paléontologues**

Sébastien Steyer et Diego Gerez

Les fossiles de l'Antarctique témoignent d'étapes clés de la vie. Le grand continent blanc a en effet plusieurs fois servi de refuge ou de pont entre l'Océanie et les Amériques, voire l'Afrique.

## 50 GÉNÉTIQUE Des interrupteurs cachés dans le cerveau

Eric Nestler

L'environnement et les expériences vécues contribueraient à l'apparition de maladies mentales par le biais des modifications épigénétiques, qui activent ou inhibent les gènes.

## 58 AGRICULTURE Assurer l'avenir du chocolat

Harold Schmitz et Howard-Yana Shapiro

Afin de répondre à la demande croissante en cacao, les scientifiques tentent d'augmenter le rendement des cultures, notamment en renforçant la résistance des cacaoyers aux maladies et aux insectes ravageurs.



## 64 CHIMIE Des polymères pour les panneaux solaires

Uwe Hahn et Francois Cardinali

Pour améliorer la performance et réduire le coût des panneaux photovoltaïques, une solution consisterait à remplacer le silicium par des polymères.

## 72 PHYSIQUE La gravitation quantique en deux dimensions

Steven Carlip

Quelle serait l'action de la gravitation si l'espace avait deux dimensions seulement, au lieu de trois? L'exploration de cette idée guide les physiciens dans la compréhension des forces fondamentales.

## Regards

### 80 HISTOIRE DES SCIENCES Halley, Mairan et les aurores boréales

Stéphane Le Gars

Quelle est l'origine des aurores boréales? Le magnétisme terrestre proposé par le Britannique Halley en 1716 ou l'atmosphère solaire invoquée par le Français Dortous de Mairan en 1733?



### 84 LOGIQUE & CALCUL La malédiction de la mauvaise file

Jean-Paul Delahaye

Sur la route, quand vous êtes pris dans un ralentissement, la file voisine semble presque toujours plus rapide que la vôtre. Vérité ou impression?

### 90 IDÉES DE PHYSIQUE Le repassage, c'est physique

Jean-Michel Courty  
et Édouard Kierlik

### 93 SCIENCES & GASTRONOMIE Grillons les grillons!

Hervé This

### 94 LIRE

Ce numéro contient en 4<sup>e</sup> de couverture de l'édition abonnés France, deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage, une offre d'abonnement Pour la Science p. 41 et une sélection de livres Pour la Science / Belin p. 70.  
En couverture: Nebraska State Museum/University of Nebraska-Lincoln

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

#### » Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de contenus exclusifs
- L'agenda des manifestations scientifiques

#### » Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

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

## → LE POIDS DES MYOPES

On ne peut pas mesurer un poids même sans l'altérer. Les physiciens savent cela. Les myopes aussi.

Supposons qu'un myope veuille se peser. S'il lève ses lunettes avant de monter sur le pese-personne, il est incapable de lire le poids qui s'affiche. S'il les garde, le pese-personne indique le poids de l'ensemble myope + lunettes. Or le myope ignore le poids de ses lunettes puisque, s'il les met sur une balance, elles ne sont plus là où elles devraient être pour qu'il puisse lire leur poids. Prof, un myope ne saura jamais combien il pèse.

Les régimes minceur sont réservés à ceux qui ont la vue perçante.

nous sommes. Nous interrompons l'affaire qui ne s'occupe pas de nous et nous nous engageons dans une nouvelle affaire surgie inopinément à notre portée.

Les moyens modernes nous poussent à zapper : plongés dans une séquence nous plongeons d'un coup dans une autre. Si on définit le hasard comme la rencontre de séries causales indépendantes (selon la formule de Cournot), les moyens modernes sont propices aux irruptions du hasard dans nos vies.



## → L'HONNÊTOCRATIE, UN MARI SUR L'AVENIR

Le nombre de modes possibles de gouvernement est vertigineux. Principaux : minuscules et empires gigantesques, despotismes éclairés et sombres tyrannies, dictatures militaires, dictatures civiles, tribus, triumvirats, consulats, autocraties, ploutocraties, démocraties (populaires ou non), républiques (bananières ou non), monarchies, dyarchies, oligarchies... : quelle anarchie ! Les hommes auront tout essayé.

Tout ? Non. « La tromperie, la falsification de la vérité et le mensonge pur et simple employés comme moyens légitimes de parvenir à la réalisation d'objectifs politiques, font partie de l'histoire aussi loin qu'on remonte dans le passé. La véracité n'a jamais figuré au nombre des vertus politiques, et le mensonge a toujours été considéré comme un moyen parfaitement justifié dans les affaires politiques. » Ce n'est pas l'histoire récente qui infirmerait ce constat établi par Hannah Arendt en 1972 (*Du mensonge à la violence*).

Ne soyons pas candides : un système politique dont les acteurs s'interdiraient de

mentir pourrait avoir des effets pervers et apporter des déconvenues. L'enfer est pavé de bonnes intentions. Mais du strict point de vue de la curiosité scientifique, il serait dommage que l'humanité s'éteigne sans que, mais, nulle part, n'ait été tentée l'expérience consistant à se faire gouverner par des gens honnêtes. Juste pour voir ce que ça donnerait.

## → ET IL ZAPPERA PAR LÀ...

Autrefois, nous allions à la messe tous les dimanches au moment choisi par nous, puis nous lisions le courrier qui nous attendait. Aujourd'hui, nous sommes avertis sitôt qu'un mail arrive, ce qui incite à le consulter sans tarder. L'esprit encore immergé dans ce que nous étions en train de faire, nous prenons connaissance de l'information qui nous est apportée.

Autrefois, quand nous n'étions pas chez nous, le téléphone pouvait sonner tant qu'il voulait, il ne nous atteignait pas. Aujourd'hui, le portable va nous chercher là où



## → NOUVEAUTÉ OBSOLÈTE

« C'est comme d'être adulte, d'être Édouard, de ne pouvoir plus rien apprendre pour toute la vie ! Nos aïeux se fiaient aux enseignements qu'ils avaient reçus dans leur jeunesse, mais nous, nous faut recommencer tous les cinq ans, si nous ne voulons pas être complètement démodés. »

Personnage de Goethe (*Les Affinités électives*), Édouard s'exprime en 1809. Ainsi, nous ne sommes pas plus bousculés qu'on ne l'était voici deux siècles ! Beaucoup parmi nous se permettent même de garder leurs objets technologiques plus de cinq ans avant de se sentir obligés de s'initier aux objets de la génération suivante.

Les observateurs qui proclament avec emphase que la vitesse d'évolution des technologies actuelles nous met aux prises avec du jamais vu ont, sans doute, l'impression d'être eux-mêmes très modernes, à leur façon : ils pensent à leur façon.

un phénomène radicalement neuf, typique de l'extrême modernité.

Et pourtant... Répondre à la question « Quoi de neuf ? » est plus difficile qu'ils ne l'imaginent.

## → VASO... CONTRITION

Grâce à l'habitude prise par les consommateurs d'inscrire sur leurs sacs toutes sortes de devises et de slogans, le moindre achat peut se transformer en occasion d'enrichissement culturel.

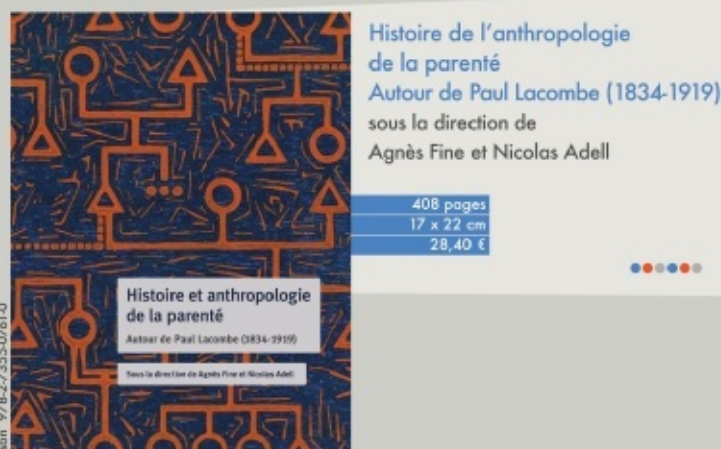
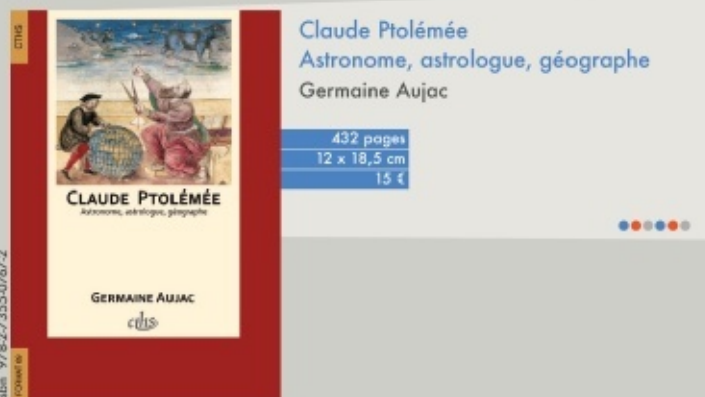
Information portée par le sac d'une pharmacie : « La vigne (*vit*) est riche en flavonoïdes et tanins. Les feuilles de vigne ont un effet vasoconstricteur remarquable pour votre corps. » Qui lit « feuille de vigne » pense « cache-sexe ». Et un mystère de l'histoire de l'art s'éclaire soudain ! Les peintures de la Renaissance représentant Adam et Ève voilés par une feuille de vigne. Or, selon la Bible, ceux-ci avaient couvert leur nudité d'une feuille non de vigne, mais de figuier. Pourquoi cette substitution ? La réponse est sur le sac. Parce que la feuille de vigne est un vasoconstricteur. Elle fait donc plus et mieux que cacher les organes : elle les rend, derrière elle, tout petit, petite. Double satisfaction pour les pudibonds.

Satanés peintres de la Renaissance, ils en connaissaient de ces particularités ! ■



## Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

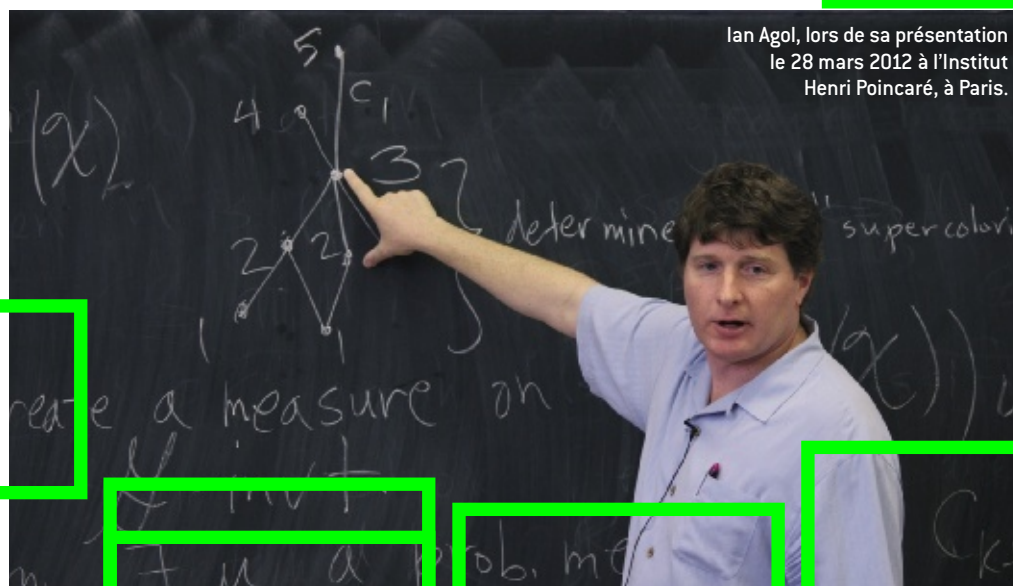


\* ventes@cths.fr \* vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr \* Distribution SCOPIS

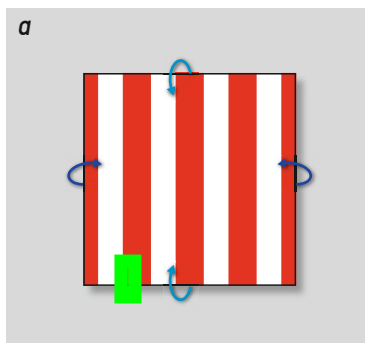
Mathématiques

## La conjecture de fibration virtuelle démontrée

L'Américain Ian Agol a prouvé une conjecture de géométrie énoncée en 1982 par William Thurston dans le cadre d'un vaste programme qui englobait notamment la conjecture de Poincaré.



On peut décrire le tore  $T^2$  comme un carré  $[a]$  dont on recolle les côtés deux à deux opposés  $[b]$ . On obtient ainsi une surface en forme de bouée  $[c]$ . Ce tore constitue une variété de dimension 2.



En 1982, l'Américain William Thurston posait 24 problèmes. L'un d'eux était la «conjecture de géométrisation», démontrée en 2003 par le Russe Grigory Perelman et qui prouvait du même coup la conjecture de Poincaré (équivalent en dimension 3 du fait que toute surface fermée et sans trou peut être déformée continûment en une surface sphérique). L'un des deux problèmes qui restaient en suspens vient d'être résolu par Ian Agol, de l'Université de Californie à Berkeley. Il s'agit de la conjecture dite de fibration virtuelle, qui affirme que toute variété de dimension 3 hyperbolique peut être dépliée en une variété fibrée. Expliquons-nous.

Une variété est une généralisation de la notion de surface. La surface d'un tore est un exemple en deux dimensions que l'on peut imaginer «plongé» dans un espace de dimension supérieure, où il devient une surface à deux dimensions. On peut aussi se dispenser de cette plongée. La surface d'un tore, noté  $T^2$ , peut alors

être représentée par un carré muni d'instructions de recollement des côtés opposés deux à deux (voir la figure A). À ce stade, un tore  $T^3$  correspond à un cube dont on recolle les faces deux à deux opposées.

On obtient une classe intéressante de variétés en épaississant une surface quelconque sans bord de façon à former un objet tridimensionnel ayant comme bords une surface intérieure et une autre extérieure. Le recollement de ces deux surfaces conduit à une variété de dimension 3 – un empilement de surfaces – que l'on peut balayer tout au long de l'épaisseur. La variété est dite fibrée en surfaces.

Toutes les variétés de dimension 3 sont-elles fibrées en surfaces? Non, c'est justement l'enjeu de la conjecture de fibration virtuelle que l'on peut reformuler ainsi : toute variété hyperbolique de dimension 3 est fibrée quand elle est épaissie de façon adéquate.

Pour comprendre cette conjecture, revenons au tore vu comme un carré recollé. Une autre façon de le voir est d'imaginer un quadrillage infini

du plan euclidien dont chaque carré est une copie du carré initial.

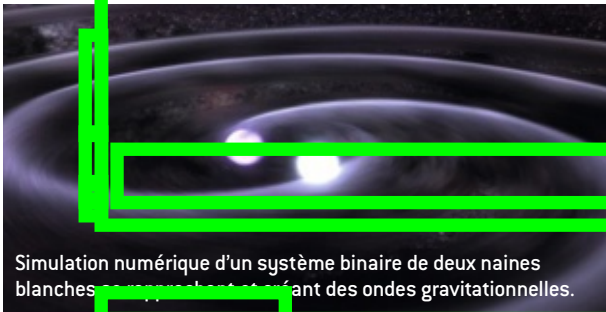
Dans cette configuration, deux carrés sont équivalents quand on peut passer de l'un à l'autre par une combinaison finie de pas (vers la droite, vers la gauche...) de longueur égale au côté du carré. Le dépliage consiste à ne s'intéresser qu'à un sous-groupe de ces transformations qui obéit à certaines contraintes (notamment, la composition de deux transformations doit aussi appartenir à ce sous-groupe). On sait désormais que pour toute variété hyperbolique, il existe une façon de la déplier pour obtenir une variété fibrée que l'on comprend particulièrement bien.

Les mathématiciens se réjouissent de cette preuve, car les travaux d'Agol ont nécessité ont conduit à de nombreux développements dans divers champs des mathématiques. En outre, elle utilise des idées issues de branches inattendues telles que l'algèbre, les probabilités. C'est à cela que l'on reconnaît un résultat important.

## Astrophysique

## Des collisions d'étoiles aux supernovae

Les supernovae de type Ia se produisent dans des systèmes binaires et l'étoile qui explose est une naine blanche. En revanche, la nature de la seconde étoile n'est pas connue. Ce pourrait être une géante rouge, dont la naine blanche absorbe la matière progressivement, ou une autre naine blanche; les deux naines, en rotation rapide l'une autour de l'autre, se rapprochent progressivement jusqu'à entrer en collision. Pour tester cette seconde hypothèse, Carles Badenes et Dan Maoz, de l'Université de Tel-Aviv, en Israël, ont utilisé une approche statistique. Ils ont sélectionné dans le catalogue spectroscopique du *Sloan Digital Sky Survey* des systèmes binaires de deux naines blanches. Ils ont alors estimé la fréquence des coalescences de ces étoiles dans notre Galaxie: environ une tous les 300 ans. Or ce nombre est comparable à celui des supernovae de type Ia, ce qui appuie l'hypothèse que les collisions de naines blanches sont à l'origine de ces explosions très énergétiques.



Simulation numérique d'un système binaire de deux naines blanches s'approchant et créant des ondes gravitationnelles.

C. Badenes et D. Maoz, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 740, L11, 2012

→ Sean Bailly

## LA SCIENCE DU POISSON-SCIE

Le poisson-scie se sert-il de sa scie? Oui, répond une équipe australienne, mais pas pour fouiller le fond sableux en quête d'une proie comme on le pensait. L'étude de jeunes poissons-scies *Isistius microdon* montre que l'apparence sert de capteur électrostatique d'arme. L'animal repère sa proie à l'aide de récepteurs électrostatiques qui recouvrent sa scie. Puis, avec celle-ci, il frappe à grande vitesse la tête de sa proie avant de l'avaler la tête en première.

En vidéo sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## INVISIBILITÉ MAGNÉTIQUE

Des physiciens slovaques et espagnols ont réalisé un dispositif qui constitue une cape d'invisibilité au champ magnétique. La cape de Fedor Gômöry et ses collègues est un cylindre dont la couche interne est formée d'un matériau supraconducteur, et la couche externe d'un matériau ferromagnétique. Avec ce dispositif, un champ magnétique extérieur uniforme reste imperceptible, comme si le cylindre et l'objet qu'on peut passer à l'intérieur n'existaient pas.

## LES GÉNÈS D'ÔTZI

Ôtzi, cet homme du Néolithique retrouvé dans un glacier à la frontière italo-autrichienne, a des « cousins » en Corse et en Sardaigne. Le séquençage de son génome a montré qu'il portait les gènes des premiers paysans néolithiques méditerranéens, arrivés en Europe et dans les îles tyrrhéniennes il y a quelque 8000 ans. Le marqueur génétique de ces premiers paysans est aujourd'hui présent chez moins de un pour cent des Européens continentaux, mais chez 9 pour cent des Sardes et 25 pour cent des Corses.

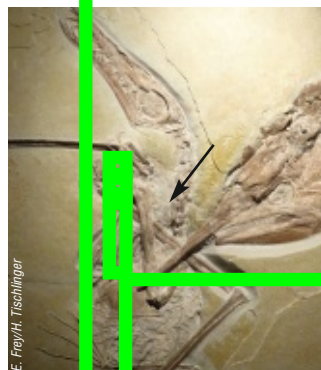
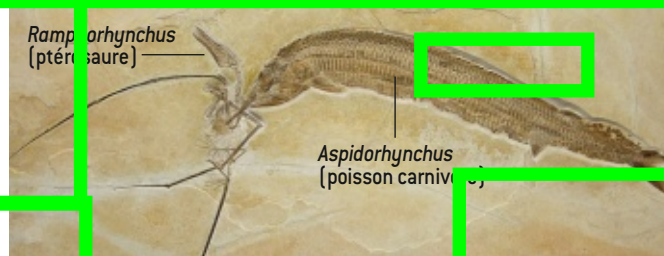
## Paléontologie

## Un ptérosaure fossilisé avec son prédateur

Son métabolisme est rapide, son vol battu vif et stable; le temps de deux battements d'ailes, et le cerveau du ptérosaure a déjà évalué la proie aperçue. Si la taille de cette dernière convient, le bec pointu, la tête, le cou puis le corps piquent dans l'eau. Quelques instants plus tard, l'animal émergera et s'envolera, un poisson au bec...

Effectuée par Eberhard Frey et Helmut Tischlinger, deux paléontologues du Muséum d'État de Karlsruhe (Allemagne), l'analyse d'une scène de prédation fossilisée montre qu'il y a 120 millions d'années, les ptérosaures du genre *Ramphorhynchus* chassaient comme les martins pêcheurs aujourd'hui.

L'un de ces petits reptiles, venant juste d'émerger de l'eau, s'élevait en l'air tout en avalant un petit poisson, quand un poisson carnivore du genre *Aspidorhynchus* de 60 centimètres de long – l'attrapa et l'entraîna sous l'eau. Il n'aurait pas dû. Le *Ramphorhynchus* se mit à se débattre si vivement que son aile gauche s'accrocha fermement aux dents du *Aspidorhynchus*.



La fossilisation a figé trois animaux dans une scène exceptionnelle: un poisson carnivore du genre *Aspidorhynchus* saisissant un ptérosaure *Ramphorhynchus*, lequel était en train d'avaler un petit poisson, ici difficilement visible (flèche).

d'être attaché à une proie aussi vive, celui-ci se mit aussi à secouer sa tête pour se libérer, mais sans parvenir à se détacher au niveau de la membrane de l'aile – un tissu probablement résistant en raison de son adaptation au vol.

Quand le ptérosaure, noyé, cessa de se débattre, l'*Aspidorhynchus* avait encore la force de le porter, mais de moins en moins celle de se détacher. Petit à petit, il fut entraîné vers les profondeurs anoxiques du lac. En l'absence totale d'oxygène, aucune bactérie ni organisme nécrophage neurent consommer les cadavres, de sorte que la scène a été figée pour l'éternité... géologique.

→ François Savatier

PLoS One, vol. 7(3), e31945, 2012

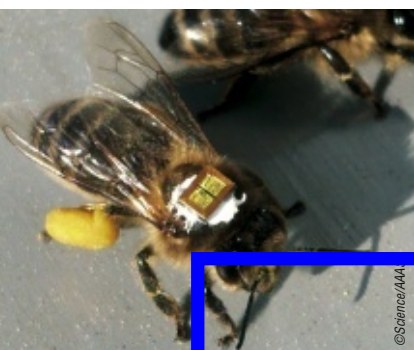
## En bref

## PRINCE ABEL 2012

Le prix Abel, créé par l'Académie norvégienne des sciences et attribué pour la première fois en 2003, est un prix de mathématiques qui se veut un équivalent du prix Nobel. Cette année, le lauréat est Endre Szemerédi, de l'Institut János Bolyai à Budapest (Hongrie) et de l'Université de l'État du New Jersey (États-Unis). Il est récompensé « pour ses contributions fondamentales aux mathématiques discrètes et à l'informatique théorique, et en reconnaissance de son impact profond et durable sur la théorie additive des nombres et la théorie ergodique ».

## BRIEFES DE VIE

Une équipe franco-allemande a fabriqué, dans des conditions semblables à celles de l'espace, une microcosmète artificielle. Au bout de dix jours d'irradiation par des ultraviolets, quelques microgrammes de matière organique ont été obtenus. Leur analyse a révélé 26 acides aminés et, surtout, six acides diamminés dont l'un était peut-être un constituant majeur de l'ancêtre supposé de l'ADN sur Terre, l'APN (acide peptidique nucléique).



© Science/AAA

Équiper les abeilles d'une radio-étiquette (RFID), comme l'a fait l'équipe française de Mickaël Henry, permet de dénombrer leurs entrées et sorties de la ruche.

## Archéologie

## Le trésor du Keltenblock

L'an 90 avant notre ère, près des sources du Danube : des Celtes parent une défunte de haut rang, puis la couchent dans une chambre en bois qu'ils protègent de la rouille avec des archéologues dégagent les bijoux de la « Dame de la Heuneburg ». Après 2600 ans, ils luisent à nouveau mais sous les néons.

Le Keltenblock, c'est-à-dire le « bloc celte », est en effet la première chambre funéraire fouillée... en chambre. Connu dans toute l'Allemagne, car ses 80 tonnes ont été prélevées en bloc devant les caméras, il provient de la première tombe d'apparat découverte intacte à la Heuneburg, citadelle celte surplombant le Danube en Forêt-Noire, qui est non seulement la plus grande sépulture de l'époque (du VIII<sup>e</sup> au V<sup>e</sup> siècles avant notre ère), mais la meilleure candidate au rôle de la ville de Pyrène que Hérodote mentionnée.

Confrontés à un tel trésor scientifique, Dirk Krause et Nicole Ebinger-Rist, des Monuments historiques du Baden-Wurtemberg, ont tenu à bénéficier pendant la fouille des moyens d'un laboratoire de restauration. Et, à chaque découverte d'une partie des bijoux d'or, de bronze et d'ambre de la Dame de la Heuneburg, cela leur a permis de convoquer la presse... Ces bijoux proviennent manifestement d'un atelier étranger, de l'autre côté du Rhin, ce qui illustre l'influence du monde méditerranéen sur la classe dominante celte. De la datation des bijoux, la comparaison des planches de la chambre, les archéologues infèrent



Monuments historiques du Baden-Wurtemberg

Une partie des bijoux d'or et de bronze de la « Dame de la Heuneburg » dégagés de sa chambre funéraire, prélevée en bloc pour être transportée et analysée.

que la princesse a été enterrée vers 590 avant notre ère. La photographie des débris de son crâne a révélé son âge, entre 30 et 40 ans. Une suivante l'accompagnait dans la mort. Y fut-elle contrainte ? Probable vic-tuaille pour son voyage pour l'au-delà, un cochon entier était aussi présent dans la tombe, ainsi que des pots peut-être remplis d'aliments. Des restes de tissus et d'autres textiles ont aussi été découverts, ainsi que des perles qui compo-saient des bijoux. L'étude du Keltenblock va encore durer des années, il est déjà clair qu'il s'agit de la mieux conservée des tombes d'Europe hallétienne connues.

→ F.S.

## Environnement

## Abeilles, bourdons et insecticides

Les populations d'abeilles et de bourdons, pollinisateurs importants, subissent depuis plusieurs années un déclin rapide et inexpliqué. Plusieurs facteurs sont probablement à l'œuvre, mais l'impact négatif des pesticides répandus sur les cultures devient de plus en plus évident. Trois études récentes l'illustrent.

Mickaël Henry, de l'INRA à Avignon, et ses collègues ont soumis des abeilles domestiques à des doses faibles, non létales, de thiaméthoxam, une substance de la famille des néonicotinoïdes, des

40,2 pour cent des abeilles traitées ne retournent pas à la ruche : l'intoxication se traduit par une diminution de leurs sens de l'orientation.

Quant à l'étude de Penelope Whitehorn et ses collègues, de l'Université de Lancaster, elle a porté sur les bourdons (*Bombus terrestris*) exposés à des doses non létales d'imidaclopride, un autre néonicotinoïde courant. Les biologistes ont constaté que les colonies traitées se développent moins (les bourdons ont recueilli moins de nourriture ou il y avait moins de bourdons ouvriers). Sur-tout, elles produisent moins de reines : une ou deux en moyenne, contre 13 pour les colonies non traitées.

Enfin, l'équipe de Nicolas Blot, du CNRS et de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, a montré que l'effet combiné sur les abeilles domestiques d'un insecticide (le fipronil) et d'un parasite (*Nosema ceranae*, un organisme unicellulaire) est plus important que la somme des deux effets pris séparément. Cette synergie confirme plusieurs études précédentes et est, de plus, indépendante de l'ordre dans lequel les abeilles subissent les deux stress : d'abord une infection parasitaire puis une exposition à l'insecticide, ou l'inverse, ou les deux simultanément.

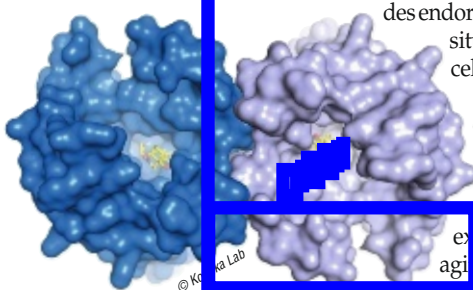
→ Maurice Mashaal

Science, prépublications en ligne, 29 mars 2012 ;  
Science, 29 mars 2012.

## Neurobiologie

## Morphine : le récepteur en 3D

La morphine et la codéine, substances actives de l'opium, agissent dans le cerveau et la moelle épinière et ont des effets analgésiques, sédatifs et euphorisants. Elles miment les opiacés naturellement produits dans le cerveau : les endorphines. Mais elles présentent des effets secondaires – tolérance et dépendance notamment – qu'on n'ont pas les endorphines. Sébastien Granier, de l'Institut de génomique fonctionnelle à Montpellier, Brian Kobilka, de l'Université Stanford, et leurs collègues ont déterminé par cristallographie l'arrangement tridimensionnel de la chaîne de l'opioïde et des endorphines : le récepteur  $\mu$ -opiacé, situé au niveau de la membrane cellulaire des neurones.



Quand ils fixent la morphine (en jaune) deux récepteurs  $\mu$ -opiacés forment un dimère.

Les chercheurs ont ainsi établi que le site de liaison de la morphine à ce récepteur est facilement accessible du côté extérieur de la cellule ; cela explique pourquoi la morphine agit si vite. Ils ont aussi découvert que quand les récepteurs ont fixé

l'opiacé, ils s'associent par deux, formant un dimère, pour déclencher la réaction cellulaire qui aboutit aux effets analgésiques et sédatifs. Il reste à montrer que les endorphines n'engendrent pas la même conformation des récepteurs. En effet, les scientifiques pensent que la morphine et les endorphines, malgré leur structure chimique semblable, activent le récepteur

de manière différente, ce qui expliquerait pourquoi la morphine a, contrairement aux endorphines, des effets secondaires.

→ **Dé-filiste** : Céline Lescellier

A. Manglik et al., *Nature*, en ligne, 21 mars 2012

## Astronomie

## Super-Terres par milliards

Les naines rouges représentent 80 pour cent des étoiles de la voie lactée, soit environ 160 milliards d'astres. Des astrophysiciens de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble et leurs collègues ont utilisé le spectrographe HARPS du télescope de 3,60 mètre à l'Observatoire européen austral de la Silla, au Chili, pour estimer combien de ces étoiles sont accompagnées de planètes dans la zone habitable – la région où une planète est susceptible d'avoir de l'eau liquide à sa surface. Ils se sont intéressés aux cas des super-Terres, de masse comprise entre une et dix fois celle de la Terre, planètes principalement composées de roche et qui sont peut-être dotées d'une atmosphère plus ou moins épaisse.

Les astrophysiciens ont ainsi montré que 41 pour cent des naines rouges auraient une super-Terre dans la zone habitable. Pour toute la galaxie, cela équivaut à des milliards de super-Terres. Dans le voisinage proche, à moins de 33 années-lumière, ce sont une centaine de super-Terres qui pourront prochainement être étudiées pour mieux connaître la structure de ces planètes.

→ **S. B.**

X. Delfino et al., *Astronomy & Astrophysics*, à paraître, 2012

## Biophysique

## L'ingénieuse catapulte des fougères

Parmi les multiples stratégies de dispersion des graines (ou des spores) ayant émergé au fil de l'évolution, celle des fougères est encore plus étonnante qu'on ne le pensait. Xavier Noblin, du Laboratoire de physique de la matière condensée de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis et du CNRS, et ses collègues l'ont montré en filmant la plante à l'aide d'une caméra ultra-rapide.

Sous leurs feuilles, les fougères portent de petits amas de sporanges, des capsules microscopiques qui produisent et contiennent les semences – les spores. Le mécanisme de dispersion des spores est connu depuis longtemps : les capsules s'ouvrent et catapultent les spores en se refermant brusquement. Toutefois, une énigme persistait. Habituellement, les catapultes sont équipées d'une butée qui stoppe le fléau dans sa course. Sans butée, la charge resterait dans le fléau, qui la pla-

querait au support. Or, chez les fougères, les capsules de fougère n'ont pas de butée, les spores sont projetées en l'air...

Comment est-ce possible ? Grâce à un mouvement à deux vitesses, ont montré X. Noblin et ses collègues en décortiquant sa cinématique. L'élément clef de ce mécanisme est une crête, une rangée de 12 à 13 cellules qui forme une crête enveloppant le sporange à partir de son bord. Quand la catapulte s'arme : en se chargeant, le fléau s'incurve et la crête s'effondre sur elle.

Ensuite, sous l'effet de la tension provoquée par l'évaporation de l'eau,

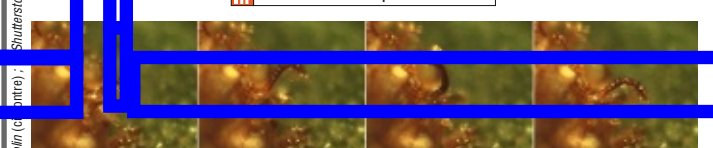
l'anneau, la capsule s'ouvre. Puis la phase de projection des spores débute. Quand la tension due à l'évaporation de l'eau atteint une valeur critique, des bulles d'air se forment dans les cellules de l'anneau, ce qui amorce une inversion de la courbure de la crête. Ce changement de conformation déclenche la fermeture de l'anneau et la libération, sous forme d'énergie cinétique, de l'énergie élastique qu'il stockait. Cette première étape, inertielle et très rapide, referme l'anneau de 30 à 40 pour cent en dix microsecondes, ce qui projette les spores à plus de dix mètres par seconde. Puis l'anneau continue à se refermer, mais plus lentement, cette fois sur une échelle de plusieurs centaines de millisecondes.

Cette rupture nette de vitesse serait due à la structure des parois de l'anneau : poreuses, ces dernières sont entourées d'eau qui s'écoule dans un sens ou dans l'autre en fonction de leurs mouvements. Toutefois, la première phase de détente est si rapide que l'eau n'a pas le temps de s'écouler. Lorsque la détente se ralentit, l'eau se remet à s'écouler à travers les parois poreuses, le mouvement, par viscosité. Ce ralentissement provoque la rupture de l'anneau.

→ **Marie-Neige Cordonnier**

X. Noblin et al., *Science*, vol. 335, p.1322, 2012

En vidéo sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



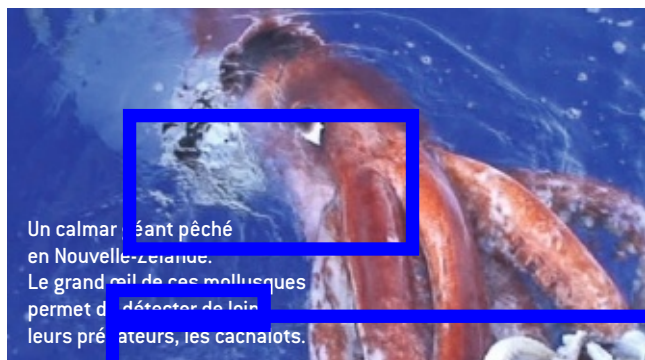
Un sporange de fougère *Polypodium aureum* s'ouvre en inversant sa courbure, puis se referme brusquement (dernière image), ce qui éjecte des spores.

## Biologie animale

## L'œil géant du calmar géant

Les calmars géants (*Architeuthis*) et colossaux (*Teuthidochocoteuthis*) ont les plus gros yeux du règne animal : jusqu'à 27 centimètres de diamètre, soit plus gros qu'un ballon de basket ! Dans- Eric Nilsson, de l'Université de Lund, en Suède, et ses collègues ont voulu savoir quels avantages procurent de tels yeux. Entre 300 et 1 000 mètres de profondeur, là où vivent les calmars, un objet se distingue soit par le contraste de sa silhouette sur le fond bleu de l'eau, soit par la bioluminescence émise par le plancton bousculé par le mouvement de l'objet. Cette seconde méthode est d'autant plus prépondérante que la profondeur est grande. Les biologistes ont montré que jusqu'à 600 mètres de profondeur, un œil de neuf centimètres de diamètre est un optimum. Mais au-delà, l'œil démesuré des calmars devient une arme à double tranchant : la lumière qu'il capte provoque la bioluminescence stimulée par un important déplacement d'eau dû à un animal imposant. C'est typiquement le signal d'un cadavre en chasse, le principal prédateur des calmars.

→ L. M.

D.-E. Nilsson et al., *Current Biology*, prépublication en ligne, 2012

Un calmar géant pêché en Nouvelle-Zélande. Le grand œil de ces mollusques permet de détecter de loin leurs prédateurs, les cachalots.

© New Zealand Ministry of Fisheries

## Agronomie

## Du blé dur tolérant au sel

Cultiver du blé dur sur des terres salines ? Cela pourrait devenir possible. Grâce à une espèce ancienne de blé, Matthew Gillham, de l'Université d'Adélaïde, en Australie, et ses collègues ont créé une variété de blé dur qui tolère mieux le sel. La tolérance au sel reflète la capacité de la plante à maintenir, malgré le sel présent dans le sol ou l'eau qui l'irrigue, une faible concentration d'ions sodium dans ses feuilles, afin de ne pas perturber la photosynthèse et, par conséquent, la croissance. L'équipe de M. Gillham a montré qu'une espèce ancestrale de blé, *Triticum monococcum*, tolère le sel grâce à un gène noté *mHKT5-A* ; ce dernier code un transporteur qui élimine une partie des ions sodium du système racinaire et réduit ainsi leur transport au sein de la sève vers les feuilles. Par croisements, les chercheurs australiens sont parvenus à intégrer ce gène à du blé dur (*Triticum turgidum aestivum*), créant ainsi une variété de blé dur tolérante au sel. Les essais en champ montrent notamment qu'à salinité élevée, le rendement (1,6 tonne par hectare) correspond à 25 pour cent à celui de la variété non modifiée.

→ M. M.

R. Munns et al., *Nature Biotechnology*, en ligne, 11 mars 2012

## Médecine

## Obésité, diabète et perturbateurs endocriniens

L'obésité ne serait pas seulement liée à une alimentation trop riche, au manque d'exercice et aux prédispositions génétiques. L'exposition à certaines substances chimiques, notamment des perturbateurs endocriniens – des molécules qui modifient le fonctionnement des hormones –, jouerait un rôle important dans le développement de la maladie. Le diabète aussi serait directement concerné si nombre de cas sont liés à l'obésité, de plus en plus de personnes ne présentant pas de surpoids contractent la maladie et, là encore, l'exposition aux substances chimiques ne serait pas anodine. C'est la conclusion de deux rapports publiés en mars, l'un par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), l'autre par l'association britannique CHEM Trust.

Selon l'Organisation mondiale de la Santé, 700 millions de personnes dans le monde seront obèses en 2015, soit 75 pour cent de plus qu'en 1975. En France, la population obèse a doublé entre 1997 et 2009, atteignant 6,5 millions d'individus.

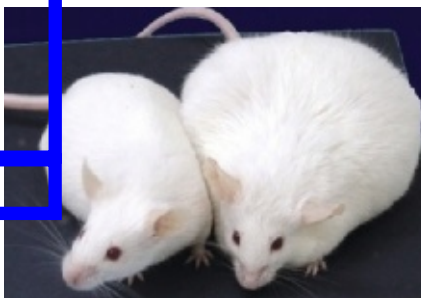
La progression du diabète est elle aussi inquiétante. Cette pathologie touche aujourd'hui 220 millions de personnes dans le monde, contre 30 millions en 1995. En France, l'incidence du diabète a presque doublé entre 2003 et 2009.

La nutrition et la sédentarité ne suffisent pas à expliquer ces épidémies. De plus en plus d'études

expérimentales et épidémiologiques suggèrent que l'exposition à des perturbateurs endocriniens serait aussi en cause. Le bisphénol A et les phtalates (plastiques), des polluants organiques persistants tels les dioxines (dérivés de combustion) et les polychlorobiphényles (isolants), des pesticides, des organostannés, ont été impliqués dans la prise de poids chez l'animal. Les mêmes substances entraînent en outre des perturbations métaboliques semblables à celles qui apparaissent avec le diabète de type II. Les perturbateurs endocriniens ne sont pas les seules substances concernées : des éléments tels que le mercure ou l'arsenic et l'exposition à la nicotine ont aussi un effet.

Ces résultats sont à confirmer, notamment par des études chez l'homme. Mais pour nombre de médecins, les preuves sont suffisamment alarmantes pour que des mesures de précaution et de surveillance systématique soient prises dès à présent, concluent les deux rapports. C'est aussi l'avis de Barbara Demeneix, directrice du Laboratoire Évolution des Régulations endocriniennes (CNRS/MNHN) : « Il est urgent d'identifier les 20 substances les plus incriminées et de leur substituer des composés plus sûrs. »

Rapport ECOD du RES et rapport CHEM Trust, mars 2012

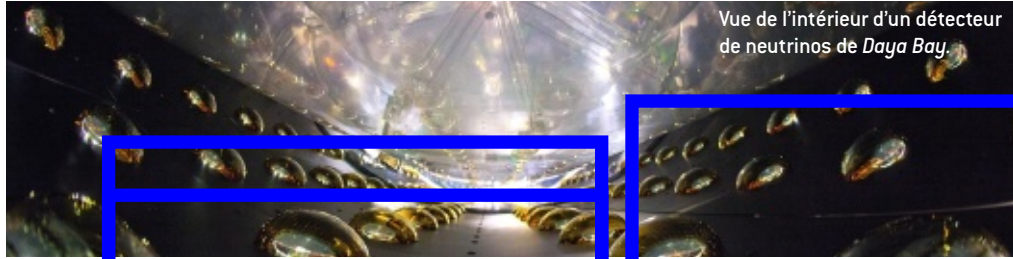


Une souris femelle traitée de quatre à six mois au diéthylstilbestrol – une substance pharmaceutique interdite en 1977, mais qui persiste très longtemps dans l'environnement –, prend beaucoup plus de poids qu'une souris non traitée.

Après Mol Cell Endocrinol., vol. 304, R. Newbold et al., Environmental estrogens...

## Physique des particules

# Les neutrinos continuent à se dévoiler



Vue de l'intérieur d'un détecteur de neutrinos de Daya Bay.

R. Kaltschmidt, L. Berkeley / J. J. Laboratory

Les neutrinos sont des particules étonnantes. Ils existent en trois saveurs (électronique, muonique et tauique), ils peuvent spontanément échanger au cours du temps – on parle d'oscillation des neutrinos – et leurs masses sont très faibles. Le calcul des probabilités d'oscillation des neutrinos met en jeu plusieurs paramètres : les différences de masse d'une saveur à l'autre de neutrinos, mais aussi des « angles de mélange » entre les différents neutrinos. Le paramètre le mieux connu, l'angle de mélange noté  $\theta_{13}$ , vient d'être mesuré par l'expérience *Daya Bay*, installée près d'une centrale nucléaire en Chine.

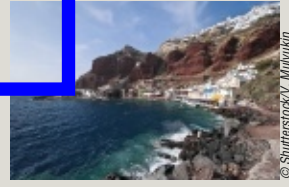
Les réacteurs nucléaires sont une source d'antineutrinos électroniques (antiparticules des neutrinos de même saveur). Les physiciens ont calculé l'angle de mélange  $\theta_{13}$  en mesurant le déficit d'antineutrinos dans des détecteurs éloignés par rapport aux détecteurs proches des réacteurs. La valeur de l'angle de mélange se révèle suffisamment grande pour permettre l'étudier un autre paramètre, une « phase » qui caractérise la différence de comportement entre les saveurs de neutrinos. C'est pourquoi cette dernière semble absente de l'Univers.

→ S. B.

F. P. An et al., *Physical Review Letters*, à paraître, 2012

## UN ÉVÉNEMENT DE SANTORIN ?

Les mesures de stations de géolocalisation GPS indiquent un regain d'activité de la caldeira de Santorin : elle se serait dilatée de cinq à six centimètres entre janvier 2011 et janvier 2012. Andrew Newman, de l'Institut de technologie de Géorgie à Atlanta, estime que ce phénomène est dû à une montée de magma : 14 millions de mètres cubes de roche en fusion auraient rempli une chambre magmatique à quatre kilomètres de profondeur sous le volcan depuis l'an dernier.



© Shutterstock / Maymun



**LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM**

**CONFÉRENCES**

Cycle : "Rio + 20 - Enjeux économiques de la Biodiversité"

Coordinateur : **Jean-Patrick Le Duc**

**Lundi 7 mai - 18h**  
Le rôle économique de la grande faune (santé, alimentation, tourisme)  
*Sabrina Krief*, primatologue, Muséum

**Lundi 14 mai - 18h**  
La valeur économique et culturelle des produits forestiers non ligneux  
*Serge Bahuchet*, professeur d'ethnobiologie, Muséum

**Lundi 21 mai - 18h**  
La vie dans les océans, biodiversité et ressources  
*Gilles Boeuf*, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, président du Muséum

**FILMS**

Séance spéciale - Dans le cadre de la Fête de la nature (festival Pousse Pousse)  
**Dimanche 13 mai à 16h : Dans la toile de Christine Rollard**  
A travers des extraits de films, Christine Rollard, aranéologue au Muséum, démontrera combien les araignées sont surprenantes ! (à partir de 5 ans, entrée réservée en priorité aux enfants accompagnés)

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution  
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu

**Au Jardin des Plantes**

Détails sur  
[www.jardindesplantes.net](http://www.jardindesplantes.net)  
dans "l'agenda du jardin"

**BAR DES SCIENCES**

**Mercredi 23 mai à 19 h 30 : L'économie bleue**  
Avec *Élie Jarmache*, Secrétaire général de la mer,  
*Philippe Gouletquer*, directeur scientifique à l'Ifremer et  
*Yves Le Gall*, directeur honoraire de la station de biologie marine de Concarneau

Café/Restaurant de La Baleine  
47 rue Cuvier, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu



## Physique

## Neutrinos : ICARUS infirme

Les physiciens de l'expérience OPERA avaient annoncé un résultat surprenant en septembre 2011 : des neutrinos se déplaceraient à des vitesses supérieures à celle de la lumière. Six mois plus tard, ils indiquaient avoir repéré deux possibles sources d'erreurs expérimentales, susceptibles d'invalidiser cette mesure étonnante. Depuis, l'équipe aurait confirmé que l'erreur provenait du mauvais fonctionnement d'une horloge optique et d'un système de géolocalisation GPS, en utilisant des muons cosmiques et une autre expérience, LVD, présente dans le même laboratoire qu'OPERA, qui leur a permis de comparer leurs horloges.

Par ailleurs, les physiciens d'une troisième expérience, ICARUS, installée sur le même site, ont annoncé leurs propres résultats sur la mesure de la vitesse des neutrinos. Ils ont utilisé le même faisceau de particules que OPERA. Ils concluent maintenant que la vitesse des neutrinos n'excède pas celle de la lumière. Tout le monde est rassuré...

M. Antonello et al., prépublication, <http://arxiv.org/abs/1203.3433>

## Parasitologie

## Une faim de dengue !

La dengue est due à un virus qui est transmis par un moustique du genre *Aedes*. Shuzhen Sim, de l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis, et ses collègues ont mis en évidence des mécanismes par lesquels le virus favorise sa transmission. Les biologistes ont analysé et comparé les protéines fabriquées par un moustique sain et par un autre, porteur du virus. L'infection modifie l'expression de 147 gènes de l'hôte. Plusieurs correspondent à des protéines qui favorisent la réplication du virus dans la glande salivaire. Le virus niche aussi dans les organes de détection de l'insecte, dont les antennes, et en augmente la sensibilité en accroissant la quantité de protéines qui se lient aux molécules odorantes. Le repérage d'une proie est donc amélioré. Ces protéines rendent le moustique plus efficace dans sa quête. Ainsi, infecté par le virus de la dengue, le moustique favorise la multiplication du parasite, et du même coup le sang et est plus sensible aux odeurs qui le mèneront vers sa proie !

→ L. M.

S. Sim et al., *PloS Pathogens*, vol. 8(3), e1002631, 2012

## Sciences de la Terre

## Une grande débâcle glaciaire il y a 14 500 ans

Le niveau des mers est monté de 10 mètres depuis le dernier maximum glaciaire. Régulièrement ou par sauts ? Pierre Deschamps et ses collègues des Universités d'Aix-Marseille, d'Oxford et de Tokyo ont estimé qu'une remontée catastrophique du niveau des océans a bien eu lieu il y a 14 500 ans.

Cet événement noté MWP-1A (de l'anglais Melt Water Pulse) a été reconstruit en forant 37 fois le récif tahitien. Parce qu'ils vivent à faible profondeur, les coraux tropicaux sont en effet d'excellents indicateurs du niveau des océans. Les chercheurs ont daté ces coraux en s'appuyant sur la transformation radioactive de l'uranium 234 en thorium 230 et noté qu'il y avait 14 500 ans, une énorme débâcle glaciaire a élevé le niveau des océans de 14 mètres en moins de 100 ans.

En comparant, deux scénarios concourent pour placer l'événe-

ment. Le premier, l'événement s'explique par la fonte des calottes de l'hémisphère Nord. Toutefois, si c'était le cas, les modifications du champ gravitationnel qui s'ensuivent auraient dû entraîner une remontée océanique inférieure de 40 pour cent. Le second scénario, d'après lequel les calottes antarctiques ont aussi fondu, est semble privilégié.

La nouvelle datation de l'événement MWP-1A le fait coïncider avec un réchauffement rapide de l'hémisphère Nord. Or selon la courbe de remontée du niveau marin de La Barbade, ce réchauffement aurait précédé la débâcle du MWP-1A. La nouvelle datation est juste la seule explication plausible. La grande débâcle glaciaire a reorganisé les courants marins dans l'Atlantique. C'est ce qui a réchauffé l'hémisphère Nord.

→ F. S.

*Nature*, vol. 483, pp. 559-564, 2012

Au large de Tahiti, le navire utilisé pour les forages du récif.

Pierre Deschamps/Ifremer

## DERNIÈRE minute ...

## UN TYRAN À BELLES PLUMES

*Yutyrannus huali*, ou tyran à belles plumes : c'est le nom d'un dinosaure cousin de *Tyrannosaurus* découvert en Chine par Xing Xu, de l'Académie chinoise des sciences, et ses collègues. Péchant 1,1 m, kilogrammes et long de neuf mètres, c'est le plus gros dinosaure à plumes jamais retrouvé. Il vivait il y a environ 125 millions d'années, dans une période froide

où ses plumes pourraient lui avoir servi d'isolant thermique.

## LES GÈNES SOUMIS AU STRESS SOCIAL

Une équipe de l'Université de Chicago a découvert que le langage social d'un macaque est étroitement associé à l'expression de près de 1 000 gènes, dont certains liés au système immunitaire. Jenny Tung et ses collègues ont

montré à partir de prélèvements sanguins, que les changements de comportement des singes en captivité se traduisent par une modification de l'expression génétique en quelques semaines.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

## → LE GARDE-CORPS BOTULIQUE

C'est une bactérie à deux flagelles, l'un de mort (ses toxines paralysent) et l'autre de vie (elle sert à soigner). Autour de Rongsheng Jin, de l'Institut pour la recherche médicale de Sanford-Burnham (La Jolla, Californie), et d'Andreas Rummel, de l'École supérieure de médecine de Hünovre (Allemagne), des chercheurs viennent de préciser comment les toxines de *Clostridium botulinum* résistent à la très forte acidité de l'estomac (*Science*, 24 février 2012).

Heureusement rare, le botulisme s'observe après ingestion d'aliments contaminés avec *Clostridium botulinum* ou l'une de ses toxines. César Mattei et Frédéric Meunier nous expliquaient récemment que, pour résister à l'environnement acide du tube digestif, les toxines botuliques sont sécrétées avec un complexe protéique à plusieurs sous-unités (voir « Toxines botuliques : poison et médicament », *Pour la Science*, mars 2012, [http://bit.ly/PLS413\\_Mattei](http://bit.ly/PLS413_Mattei)). C'est ce complexe que les chercheurs ont étudié de près. Ils ont été surpris de découvrir qu'une toxine botulique interagissait avec une sous-unité du complexe protéique qui lui est très semblable, sauf qu'elle n'est pas toxique.

Nommée non-hémagglutinine non toxique ou NTNHA (de l'anglais *nontoxic nonhemagglutinin*), cette protéine se lie à une toxine botulique, et, tel un garde du corps, la protège des attaques acides. En outre, les chercheurs ont découvert que c'est la modification de l'acidité au sein du petit intestin qui provoque la séparation du complexe toxine/garde du corps, préalable à la libération de la toxine dans le flux sanguin. Ces données suggèrent de nouvelles pistes de développement thérapeutique. Le principal frein à l'efficacité d'un médicament est en effet sa dégradation par les sucs gastriques. Les résultats de l'équipe de R. Jin suggèrent que des pilules pourraient être conçues en associant un principe actif (une protéine) à un « garde du corps » qui, comme le NTNHA dans le cas de la toxine botulique, le protégerait des attaques acides au sein de l'estomac.

## → DÉCOUVERTE D'UN PHARAON

Connaissez-vous la XVII<sup>e</sup> dynastie égyptienne ? En tout cas comme beaucoup d'autres, elle est difficile à situer précisément dans le temps (voir « Le casse-tête de la chronologie égyptienne », *Pour la Science*, mars 2012, [http://bit.ly/PLS413\\_Schneider](http://bit.ly/PLS413_Schneider)). La XVII<sup>e</sup> dynastie se place juste avant le Nouvel Empire, et couvre la lutte contre les Hyksos, d'origine asiatique, qui se sont rendus maîtres de la Basse Égypte pendant plus d'un siècle. Or une équipe du Centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak vient de découvrir une donnée historique précieuse : les noms officiels de l'un des pharaons les plus mal connus de la XVII<sup>e</sup> dynastie.

Sénakht-en-Rê n'était connu que par trois documents rédigés un à deux siècles après son règne. Mais les égyptologues savaient son importance, puisqu'ils les anciens Égyptiens eux-mêmes le considéraient comme un ancêtre des souverains fondateurs du Nouvel Empire. La preuve épigraphique de son existence aura finalement été découverte sur le linteau de la porte en calcaire d'un grenier, découvert dans le temple de Ptah à Karnak. Une fois que ce bloc d'une tonne, installé sur un nouveau correspondant à la période intermédiaire entre la XVII<sup>e</sup> et la XVIII<sup>e</sup> dynasties, a été extrait à la grue, les égyptologues ont pu lire le cartouche identifiant son constructeur. Il leur a confirmé que le nom Sénakht-en-Rê s'accompagnait à la fois du nom de Horus, du titre de roi de Haute- et Basse-Égypte et de celui de fils de Rê. Avec de tels noms, Sénakht-en-Rê n'aurait pas dû disparaître aussi longtemps !

Le cartouche de Sénakht-en-Rê.

CNRS-CFEETK / Biston-Moulin

## → NEANDERTAL FACE AU CLIMAT

Les coups de froid répétés du stade glaciaire 3 – la période qui s'étend de 28 900 à 27 600 BP (BP signifie avant 1950) – semblent avoir été bien difficiles à traverser pour les Néandertaliens. C'est ce qu'il a révélé une équipe hispano-suédoise dans les gènes mitochondriaux de 13 Néandertaliens (*Molecular Biology and Evolution*, 30 janvier 2012) : l'étude, explique Love Dalén du Muséum de Stockholm, montre que la diversité génétique mitochondriale des derniers Néandertaliens européens était très faible par rapport à celle de la population néandertalienne d'il y a plus de 40 000 ans. Cela suggère que les Néandertaliens européens ont presque disparu il y a quelque 50 000 ans, puis qu'une petite population a recolonisé l'Europe, où elle a survécu jusqu'à l'arrivée des hommes modernes, il y a 40 000 ans.

Ces indices génétiques corroborent le tableau de l'extinction des Néanderta-

liens et croisés que nous brossaient Anna Degioanni, Virginie Fabre et Silvana Condemi, de l'Université de la Méditerranée (Marseille) en 2009 (voir « Les messages cachés dans les gènes de Neandertal », *Pour la Science*, décembre 2009, [http://bit.ly/PLS38\\_Degioanni](http://bit.ly/PLS38_Degioanni)). Elles expliquaient qu'au sein d'un espace allant de la Croatie à l'Espagne en passant par l'Allemagne, la faible diversité de l'ADN mitochondrial néandertalien limite à moins de 10 000, et plus probablement à seulement quelques milliers, le nombre estimé de Néandertaliennes en âge de procréer. Pour apprécier les effets de aussi faibles effectifs de reproductrices, elles avaient étudié la répartition géographique de la diversité génétique mitochondriale au sein de la population néandertalienne globale. Cette diversité s'explique au mieux si l'on suppose que la population s'est fragmentée en trois sous-groupes il y a environ 50 000 ans. Le sous-groupe européen est en outre passé par un effectif très faible, du moins d'après L. Dalén et ses collègues.

François Savatier

## POINT DE VUE

# Aires marines protégées... sur le papier

*Les aires marines protégées constituent un outil efficace pour gérer les pêcheries et préserver la biodiversité. À condition que leur statut ne soit pas dévoyé !*

Joachim CLAUDET

« Les aires marines protégées sont des outils efficaces pour la gestion des pêcheries côtières et la conservation de la biodiversité. » On retrouvait cette affirmation dans de nombreux articles scientifiques traitant de la gestion des ressources marines et la conservation de la biodiversité en général. L'étude des aires marines protégées a émergé dans les années 1990 et il aura fallu une vingtaine d'années pour clairement en établir les bénéfices écologiques et socio-économiques. Mais aujourd'hui, les résultats scientifiques ayant démontré leur efficacité ne se généralisent plus aussi facilement. Comment expliquer cela ? L'efficacité de ces aires aurait-elle diminué ? L'outil ne serait-il plus adapté ? La réponse est, hélas, plus prosaïque.

L'évaluation d'une aire marine protégée implique de définir les objectifs d'un tel espace, les critères de succès et les indicateurs quantifiables permettant de déterminer si ces critères sont atteints, puis de collecter avec rigueur les données nécessaires. Mais cela suppose de définir au préalable ce qu'est une telle aire : une zone marine géographiquement délimitée, établie par des lois internationales, nationales, territoriales, tribales ou locales, destinée pour améliorer la conservation à long terme de sa biodiversité et de ses ressources naturelles. Cette définition est généralement acceptée.

À y regarder de plus près, deux types d'aires marines protégées émergent. En premier lieu, il y a les aires « multi-usages », à protection partielle, où certains usages sont interdits (par exemple la pêche sous-

marine, d'autres réglementés (par exemple la pêche au trémail, un grand filet) et d'autres autorisés (par exemple la plongée sous-marine). Tel est le cas de l'aire marine protégée des Medes, près de Barcelone.

En second lieu, il existe des « réserves marines » : pas particuliers où tous les usages extractifs (pêche) sont interdits et où, le plus souvent, les usages non extractifs (plongée sous-marine) le sont également. On parle ici de protection intégrale. Les réserves de Formentor-Rouet et du Cap Couronne, proches de Marseille, en sont des exemples.

## L'EFFICACITÉ ÉCOLOGIQUE et socio-économique des aires marines protégées est menacée par leur détournement.

La plupart des aires marines protégées dans le monde sont soit des réserves marines, soit des aires multi-usages avec des réserves marines en leur sein, qui combinent une protection partielle et intégrale, comme l'aire de Cerbère-Banyuls, proche de Perpignan, ou celle de la Grande Barrière de corail, en Australie.

Ces deux types d'espaces ont fait l'objet de nombreuses études scientifiques. Leur efficacité écologique et socio-économique en tant qu'instrument de gestion côtière ayant été établie, les États se sont engagés, lors de la convention sur la diversité biologique en 2006, à ce que dix pour cent de leurs zones économiques exclusives (jusqu'à 200 milles marins de la côte) soient couvertes par des aires marines protégées en 2010. Mais à cette date, la propor-

tion protégée était d'environ 1,2 pour cent avec seulement 0,1 pour cent en protection intégrale. À ce rythme, les objectifs ne pourraient être atteints avant... 2047 !

L'écart entre les objectifs chiffrés et la réalité de terrain a poussé plusieurs pays à entreprendre la mise en place d'aires marines protégées. D'importants chantiers ont abouti ou sont en projet. Cependant, dans de nombreux États, y compris la France, aucun texte juridique ne définit de façon uniforme la notion d'aire marine protégée. La tentation était donc grande de déclarer comme telles des zones côtières de divers statuts. Certains y voient une tentative d'harmoniser le mille-feuille administratif et juridique d'un zonage côtier aujourd'hui compliqué ; mais d'autres n'y voient tout simplement qu'une façon de gonfler les chiffres.

C'est ainsi qu'en Europe, et en particulier en France, des zones aussi diverses que les sites du réseau Natura 2000 ou les parties maritimes des zones du Conservatoire du littoral peuvent être considérées comme des aires marines protégées. Sans mettre ici en question leur bien-fondé, ces zones n'ont pas forcément la finalité attendue, à savoir « la conservation à long terme de la biodiversité et des ressources naturelles ».

C'est pourquoi les évaluer avec une grille de critères propre aux aires marines protégées conduira le plus souvent à conclure qu'elles ne sont pas efficaces.

Un autre phénomène récent est l'établissement de très grandes aires marines protégées. Cette démarche, sur le papier, est également fort louable. Cependant, de nouveau, certains n'y verront qu'une façon de

faire du chiffre, ou même d'étendre la souveraineté de certains États hors de leurs zones économiques exclusives ou sur leurs territoires ultramarins. Tel est le cas, par exemple, de l'aire marine protégée de l'archipel des Chagos, au centre de l'océan Indien, pour le Royaume-Uni, ou celle de Mayotte, dans les Comores, pour la France.

De tels espaces marins étendus sont souvent très distants des régions densément peuplées et des centres d'activités socio-économiques. De ce fait, très peu de personnes en bénéficient. Ces aires ont plus une valeur patrimoniale, mais, de nouveau, leur évaluation avec une grille propre aux aires marines protégées « classiques » tendra à conclure qu'elles ne sont pas toujours efficaces.

Enfin, cas critique s'il en est, de nombreuses aires marines protégées n'existent

que sur le papier. Dépourvues d'organisme ou de plan de gestion, ou de budget pour la surveillance et la coercition, elles ne peuvent pas remplir leurs objectifs déclarés. Elles augmentent artificiellement la proportion de zones « protégées » par les États. Ces espaces sont loin d'être propres aux pays en développement, dotés de peu de ressources financières ; on en trouve sur le territoire français et dans des pays européens proches de nos frontières ! C'est le cas, notamment, de l'aire marine protégée des îles des Cyclopes, en Sicile, ou du réseau d'aires marines de Moorea, en Polynésie française.

Nos côtes et espaces marins sont menacés. Il convient de les protéger et de les gérer

au mieux, pour des usages durables. La souplesse apportée par l'existence de nombreux outils de gestion, souvent complémentaires,

est nécessaire. Il ne faut toutefois pas qualifier tout zonage spatial d'aire marine protégée, au risque d'amoindrir la perception que les usagers peuvent avoir de cet outil de gestion, alors que leur soutien et implication sont essentiels à l'établissement et à la bonne gestion d'un tel espace. Enfin, un autre risque serait de faire croire que de telles aires sont à elles seules la solution à tous les problèmes des océans.

Joseph CLAUDET est chargé de recherche au CNRS et travaille au Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement (CIRIOBE) à Perpignan.

Il a dirigé l'ouvrage *Marine Protected Areas - A Multidisciplinary Approach* (Cambridge University Press, 2011).

Réagissez en direct à cet article sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## ÉCONOMIE

# La fiscalité sur les très hauts revenus

Quelles seraient les conséquences de la proposition de François Hollande de taxer à 75 pour cent les revenus annuels dépassant un million d'euros ?

Alain TRUNNOY

Au-delà de 360 000 euros, je prendrai tout !, promet Jean-Luc Mélenchon. Je prendrai les trois quarts au-dessus d'un million d'euros de revenu déclare François Hollande ! Les promesses de campagne fleurissent concernant le taux d'impôt à appliquer à la dernière tranche de revenus. Ces propositions ne laissent personne indifférent ; apparemment selon les sondages, elles ont fait partie des plus débattues par les Français au cours de cette campagne présidentielle. Normal, direz-vous, car il s'agit d'une rupture avec l'existant : le barème de 2012 impose à 41 % tout euro gagné au-delà de 70 831 euros (tous ces chiffres s'entendent pour une part fiscale, c'est-à-dire un foyer fiscal composé d'un seul adulte).

Ces propositions ont évidemment une dimension politique qu'il ne nous appartient pas de discuter dans cette tribune. L'idée n'est pas de trancher le débat, mais plutôt d'en analyser le fondement sur un plan économique. Nous considérons la rémunération comme provenant uniquement du travail. La réflexion sur les conséquences de la fiscalité pour l'ensemble de l'économie s'articule autour des notions de taux marginal et de taux moyen d'imposition.

Rapportons d'abord rapidement la définition du taux moyen. Ce dernier s'obtient en faisant le rapport entre l'impôt payé et le revenu total. Il existe un seuil d'exemption, au-dessous duquel on ne paye pas d'impôt sur le revenu, puis le taux moyen augmente avec le revenu, mais ne peut

jamais excéder le taux marginal, lequel augmente par tranches (le taux de chaque tranche est appliqué au montant gagné dans cette tranche). Le taux marginal est celui de la tranche où se situe le dernier euro gagné (aujourd'hui, 41 % pour le 70 831 euro gagné).

## Taux marginal et taux moyen

Prenons deux exemples dans le cas où la proposition de François Hollande serait mise en œuvre. D'abord celui d'une personne qui gagnerait 100 millions d'euros par an. Le premier million serait taxé à 39,6 % et les 99 autres le seraient au taux marginal de 75 %. Cela représenterait un taux moyen



→ [pouirlascience.naturejobs.com](http://pouirlascience.naturejobs.com)

Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

**POUR LA SCIENCE**

en partenariat avec **naturejobs**

■ Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi** dans le secteur des sciences.

■ En un clic la sélection des postes à pourvoir en France et dans les pays francophones ou voisins.

■ Une équipe Naturejobs spécialisée, au service des recruteurs francophones.  
Contact : Muriel Lestringuez  
E-mail : [m.lestringuez@nature.com](mailto:m.lestringuez@nature.com)  
Tél. : +44 20 7843 4994

**POUR LA SCIENCE.fr**

Le site de référence de l'actualité scientifique

de 74,6 %. Pour quelqu'un gagnant deux millions, le premier million serait toujours taxé à 39,6 % et le second à 75 %, ce qui ne représenterait plus que 57,3 % pour le taux moyen.

Les deux taux importent sur un plan économique. Selon la théorie économique, et plus particulièrement celle de la taxation optimale, le taux marginal d'imposition doit toujours être inférieur à 100 %. Aucune personne sensée n'accepte de travailler pour rien, ou alors c'est du bénévolat et il faut invoquer d'autres motivations !

Au-delà de cette évidence, plus le taux marginal d'imposition est élevé, plus il décourage les individus de fournir un effort ou d'obtenir une rémunération supplémentaire. Cet effet de découragement peut avoir des conséquences néfastes pour l'ensemble de l'économie. Cette remarque s'applique-t-elle aux PDG ? Tout le monde comprend qu'un PDG est jugé sur les résultats de la société qu'il dirige et, qu'en conséquence, il devrait être mieux payé s'il parvient à obtenir des résultats supérieurs à ceux des autres sociétés du secteur. Mais que signifie fournir moins d'effort pour un PDG ?

## Le PDG : une denrée anormalement rare

Il semble qu'à partir d'un certain montant, l'effort n'est plus directement lié au revenu. Le PDG d'une grande entreprise ne travaille pas plus que celui d'une PME. Il a simplement plus de responsabilité. Les décisions qu'il prend sont plus lourdes de conséquences. En cas de mauvaise décision, les conséquences en termes de chiffre d'affaires, de bénéfices et d'emplois sont plus importantes dans une grande entreprise que dans une petite. Conscientes de ce risque, les grandes entreprises se disputent les meilleurs PDG, prêtes à s'entremettre pour débaucher ceux ou celles qu'elles estiment – à tort ou à raison – aptes à prendre les meilleures décisions. Le chiffre d'affaires augmentant avec le temps, les moyens pour débaucher les meilleurs décideurs font de même. Apparemment, le salaire du PDG serait toujours plus ou moins proportionnel au montant du chiffre d'affaires. Ainsi s'explique le mécanisme qui a entretenu la demande de PDG



et poussé à la hausse leur salaire depuis une trentaine d'années.

En revanche, on perçoit moins pourquoi l'offre de très bons PDG ne s'est pas développée. Même si les écarts de salaires nets entre PDG de PME et de grandes entreprises diminuaient, les PDG ne réduiraient pas leurs efforts pour bien gérer leurs entreprises, de sorte qu'aucune répercussion négative ne serait enregistrée sur l'évolution de l'économie. En d'autres termes, à condition de raisonner en économie fermée, comme s'il n'existait aucune possibilité pour les PDG d'exercer leur talent en dehors des frontières.

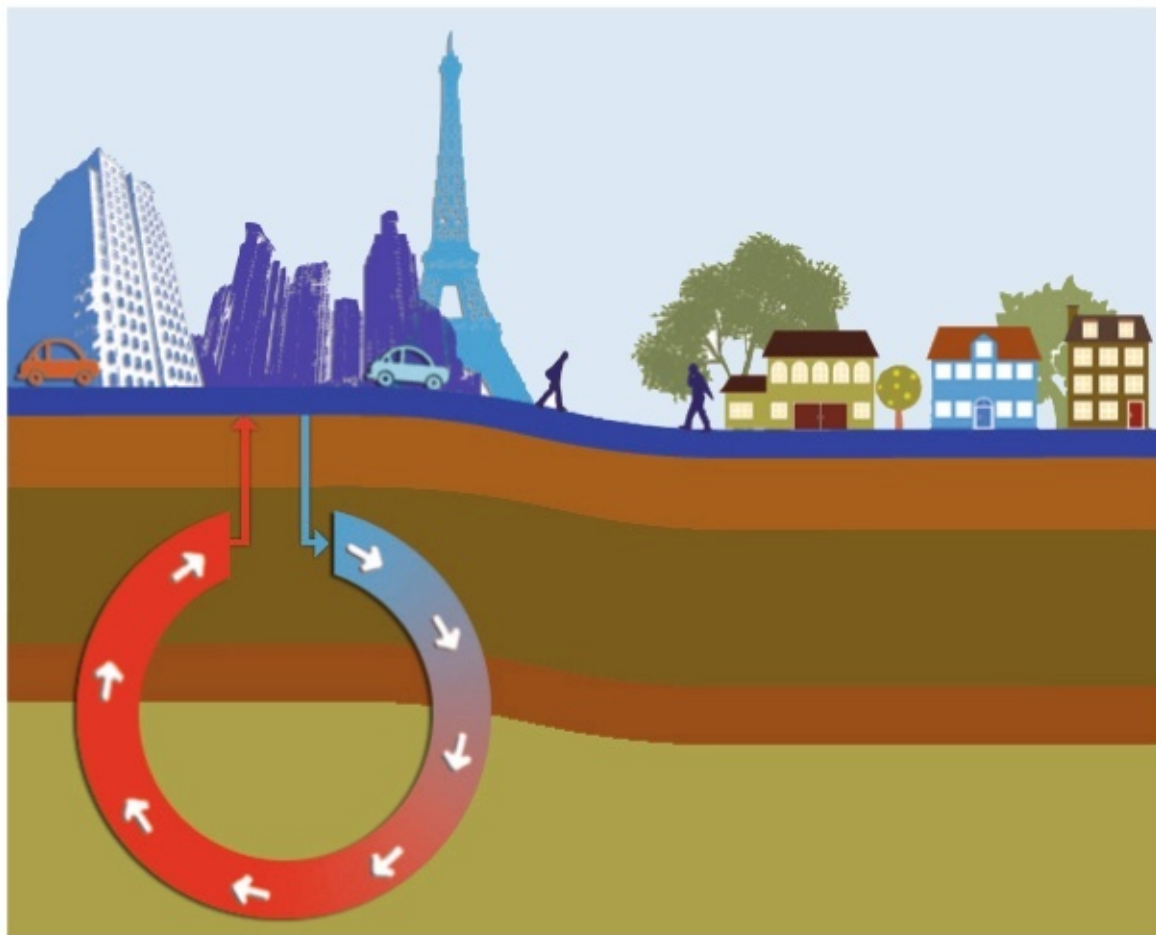
Mais que se passe-t-il si la perspective d'un impôt plus faible dans un pays étranger incite le PDG d'une entreprise à délocaliser une partie de ses activités ou à émigrer sous d'autres cieux ? Ici, c'est le taux moyen d'imposition qui importe dans la comparaison. En l'occurrence, le PDG se le demanderait si ce choix est pertinent d'un point de vue fiscal, mais aussi d'un point de vue personnel. Un éventuel mal du pays risque-t-il ou non de lui faire regretter un écart de 20 à 30 points de taux d'imposition moyen ? Une telle mesure ne devrait être prise qu'en coordination avec nos principaux partenaires et voisins, au risque d'un appauvrissement des talents s'exerçant dans le cadre national.

Alain TRANNOY est directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales, EHESS, à Marseille.

# FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

## Colloque Géothermie : l'Énergie de la Terre



**Jeudi 7 juin 2012**

9h - 13h

**Collège des Bernardins**

20 rue de Poissy - 75005 Paris

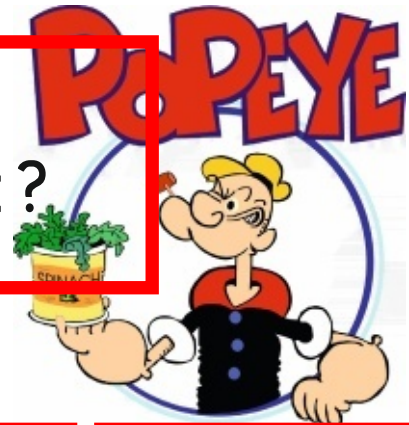


**Entrée gratuite**    Inscription obligatoire : [www.fondationecologiedavenir.org](http://www.fondationecologiedavenir.org)

## VRAI OU FAUX

## Les épinards rendent-ils plus fort ?

*Non. Ce mythe est véhiculé par le dessin animé Popeye, qui attribue une haute teneur en fer aux épinards. Or si le fer a bien de multiples vertus, les épinards en contiennent peu.*



Jean-Marie BOURRE

**L**orsqu'il est en difficulté, Popeye avale une boîte d'épinards. Ces aliments sont censés contenir du fer, qui décuplerait sa force. Qu'en est-il réellement ?

Le fer participe à de multiples fonctions biologiques. C'est un des constituants de l'hémoglobine des globules rouges (qui transportent l'oxygène dans l'organisme), de la myoglobine (qui stocke l'oxygène dans les muscles) et de nombreuses enzymes. Celles-ci interviennent dans diverses réactions métaboliques, ainsi que dans la synthèse de l'ADN, de l'ATP (la molécule vectrice de l'énergie dans les cellules) et de composés tels que l'adrénaline.

Dès lors, l'ingestion de fer tonifie aussi bien le cerveau que les muscles, notamment parce que le sang leur apporte plus d'oxygène. Une expérience dans une plantation au Sri Lanka suggère que le salaire des femmes qui récoltent le thé, payées au kilogramme ramassé, est proportionnel à la quantité de fer dans leur sang ! Ces femmes ont été équipées d'un appareil enregistrant les mouvements, du type des podomètres utilisés par les randonneurs. Celles qui mangent un peu de viande, aliment riche en fer, font presque le double de mouvements et ramassent donc deux fois plus de thé que les autres. La prise de compléments en fer a entraîné un accroissement notable de la récolte quotidienne. Des résultats similaires ont été obtenus chez des ouvriers récoltant le latex d'hévéa en Indonésie, et les cannes à sucre, à Cuba.

À l'inverse, une carence en fer ont de multiples conséquences néfastes sur la

santé : apathie, somnolence, irritabilité, incapacité à se concentrer, perte de mémoire... Les perturbations des performances mentales sont généralement réversibles et disparaissent avec la prise de fer. Un tel traitement a été appliqué à des enfants guatémaltèques, qui étaient anémiques (c'est-à-dire ayant une concentration d'hémoglobine insuffisante pour un bon transport de l'oxygène par le sang) en raison d'un déficit alimentaire et qui présentaient des scores faibles à certains tests cognitifs : ils ont rattrapé leur retard en 10 à 12 semaines.

### Des carences fréquentes

Les carences sont fréquentes en France, comme l'a montré l'étude SUVIMAX, menée par l'INSERM. Les femmes sont particulièrement touchées, car les saignements associés aux règles leur font perdre du fer : huit pour cent d'entre elles présentent certains des symptômes décrits précédemment. Les hommes peuvent aussi être atteints, en cas d'hémorroïdes, de petites blessures à répétition...

Une alimentation riche en fer est donc nécessaire. Les épinards en contiennent-ils beaucoup ? Non. Les aliments les plus riches en fer sont ceux d'origine animale : boudin noir, viande (en particulier celle de bœuf), thon rouge, coquillages... Cent grammes de boudin noir cuit contiennent ainsi 22 milligrammes de fer, contre 2 milligrammes dans 100 grammes d'épinards cuits.

En outre, le fer des végétaux est assez mal assimilé par l'organisme. On distingue deux sortes de fer dans la nourriture. Le fer dit hémique est enserré dans une structure organique complexe nommée hème. Il n'est présent que dans les aliments d'origine animale, notamment dans l'hémoglobine du sang et dans la myoglobine des muscles. Un peu plus de 25 pour cent de ce fer est assimilé et utilisé par l'organisme. Le fer non hémique, ou minéral, est libre sous forme ionique. C'est le seul présent dans les végétaux. Quatre pour cent de ce fer est assimilé en moyenne.

Ainsi, non seulement les épinards ne contiennent pas plus de fer que les autres aliments, mais de surcroît ce fer est peu biodisponible (c'est-à-dire qu'il n'est presque pas absorbé par l'organisme !). Toutefois, ils contiennent d'autres précieux nutriments : vitamine B<sub>9</sub>, magnésium, potassium...

En 1939, lors de la création du personnage de Popeye, Elzie Segar consulta une table de composition des aliments pour rechercher le plus riche en fer. En raison d'une faute d'impression, le document attribuait dix fois plus de fer aux épinards qu'ils n'en contiennent réellement. Popeye avait d'ailleurs compris que le métal des épinards n'était pas suffisant : il mangeait aussi... la boîte, en fer !

Jean-Marie BOURRE est membre des Académies de médecine et d'agriculture, ancien directeur des unités INSERM de neurotoxicologie et de neuropharmac nutrition. J.-M. Bourre, *La chrono-diététique*, Odile Jacob, 2012.



# futuroscope

Séjour  
**49,50€\***

**Parc + hôtel**  
+ Spectacle Nocturne

**25**  
**ans**



anniversaire • futuroscope • com

\*Prix comprenant 1 jour de visite Spectacle Nocturne inclus + 1 nuit avec petit déjeuner, calculé par personne pour une famille de 2 adultes (2x67€) + 2 enfants de 5 à 16 ans inclus (2x32€) en chambre quadruple à l'Hôtel du Futuroscope 1\*. Tarifs TTC valables pour la saison 2012, sous réserve de disponibilité, hors frais de gestion et assurance annulation. Consultez le calendrier d'ouverture du Parc sur [www.futuroscope.com](http://www.futuroscope.com). Les prix sont déterminés en fonction des conditions économiques en vigueur à la date d'établissement des tarifs et peuvent être révisés, même après la réservation, en cas de variations des redevances et taxes afférentes aux prestations offertes. Conditions générales de vente consultables sur [futuroscope.com](http://futuroscope.com).



Pour réagir aux articles : [courrier@pouirlascience.fr](mailto:courrier@pouirlascience.fr)  
ou directement sur les pages correspondantes du site [www.pouirlascience.fr](http://www.pouirlascience.fr)

### ✓ UN VOTE TROP COMPLIQUÉ

Les auteurs de l'article *Ne votez pas, jugez !* (*Pour la Science* n° 414, avril 2012, [http://bit.ly/414\\_vote](http://bit.ly/414_vote)) ont-ils imaginé le comportement de 44 millions d'électeurs devant le système de vote astucieux mais très compliqué qu'ils proposent, le jugement majoritaire ? Et comment dépouiller des millions de bulletins comportant 70 cases ?

Pierre Deloche

Il existe plus simple et plus efficace que le jugement majoritaire : le scrutin majoritaire à un tour. Il permet de couper court à toutes les petites candidatures irresponsables et aux manipulations électorales entre les deux tours.

C'est ce que pratique la Grande-Bretagne, qui reste un modèle de démocratie.

Charles Henri Germa

### → RÉPONSES DE MICHEL BALINSKI ET RIDA LARAKI

En ce qui concerne la complexité du jugement majoritaire, plusieurs milliers de personnes ont pratiqué ce mode de scrutin dans divers sondages et expériences électorales, toujours rapidement, avec satisfaction, sans difficulté.

Il existe plusieurs modalités de mise en œuvre ; en voici deux. Une urne pour chacun des candidats pourrait être installée. Les votants y glisseraient la mention qu'ils attribuent à ce candidat. Le dépouillement compterait la répartition des mentions de chaque urne. Pour 10 candidats, il faudrait environ cinq fois plus de temps qu'avec le scrutin majoritaire habituel. Mais garantir l'élection du meilleur candidat n'en vaut-il pas la peine ?

Autre solution, une machine de vote électronique pourrait imprimer le bulletin de vote tel que présenté dans l'article, pour fournir à l'électeur un reçu de son vote et permettre un recours. Le dépouillement, lui, serait effectué par la machine en quelques secondes.

Concernant le scrutin majoritaire à un tour, comme l'a écrit le 16 Décembre 2012, il n'y a pas pire ! Ce mode de scrutin minimise la proba-

bilité d'élire le candidat préféré des électeurs. Les sondages de début avril 2012 confirment par exemple que le candidat réellement voulu par l'électorat pourrait perdre : François Hollande gagne contre Nicolas Sarkozy en face-à-face, mais n'arriverait qu'en deuxième avec le scrutin majoritaire à un tour. En outre, ce mode de scrutin majoritaire ne favorise pas le vote honnête : en cas de nombreuses candidatures, pour qui voter ? Son favori même quand celui-ci n'a aucune chance ? Un candidat extrême, pour protester ? Ou « utilement », sans être certain que le calcul soit le bon ?

### ✓ SCÉNARIOS ÉNERGÉTIQUES EN DÉBAT

L'article *Choix énergétiques : un débat biaisé* (*Pour la Science* n° 414, avril 2012, <http://bit.ly/414-dessus>), a suscité de nombreuses réactions. Rappelons qu'il n'avait pas vocation à être exhaustif, mais plutôt à alimenter le débat... C'est chose faite ! Voici deux points parmi toutes les remarques – voire les critiques – soulevées. Retrouvez-les *in extenso* sur notre site Internet.

Pourquoi ne pas évoquer le scénario *Négatep*, proposé par l'association *Sauvons le climat* ? Ce scénario vise à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre, et s'attaque donc en priorité aux sources d'énergie autres qu'électrique. Les énergies renouvelables se substituent à une partie des énergies fossiles, et non pas au nucléaire, sans lequel les économies proposées dans l'article ne sont pas tenables.

Jean-Pierre Gaillet

Comment diminuer la consommation d'électricité de 34 pour cent d'ici à 2031 ? L'efficacité énergétique est en effet déjà mise en œuvre dans le domaine de l'électricité, où le seul potentiel d'économie réside dans le chauffage individuel. Sans compter que la généralisation des véhicules électriques entraînerait une demande supplémentaire de 60 TWh/an. Par ailleurs, pour atteindre d'ici 2031 les capacités de production photovoltaïque et éoliennes proposées, il faudrait multiplier par 292 la première et par 14 la seconde ! C'est irréalisable.

Christophe de Reyff

### → RÉPONSE DE BENJAMIN DESSUS

Le scénario *Négatep* fait en effet partie des rares scénarios énergétiques complets existants. Cependant, comme tous les autres scénarios présentés à l'exception du scénario *Négatep* et de la note de *Global Chance*, il présente une augmentation de la consommation d'électricité d'ici 2050.

Par ailleurs, le but de l'article n'était pas de comparer l'ensemble des scénarios énergétiques, mais de comparer, du point de vue des coûts pour l'usager et la collectivité, des stratégies électriques fondées sur la poursuite des tendances actuelles avec des stratégies d'économie d'électricité. D'où le choix comme référence d'un scénario central du ministère de l'Industrie.

En outre, le scénario *Négatep* repose sur l'implantation à moyen terme de réacteurs de quatrième génération... qui n'existent pas encore.

Concernant l'efficacité énergétique, le chauffage électrique, avec l'eau chaude, ne représente que 80 TWh sur une consommation des bâtiments résidentiels de l'ordre de 280 TWh. Le reste est imputable aux applications dites spécifiques de l'électricité. Les possibilités d'économies dans ce domaine sont très importantes et économiquement rentables.

Bien entendu, si les applications de l'électricité changeaient fondamentalement (par exemple avec l'arrivée massive de véhicules électriques), la consommation augmenterait. Mais la comparaison a été établie avec un scénario officiel répondant aux mêmes types de besoins.

Par ailleurs, le rythme d'implantation du système électrique proposé suit celui de la loi du Grenelle de l'environnement pour 2020. La multiplication par deux de l'éolien entre 2020 et 2030 se justifie par l'arrivée à maturité des champs éoliens offshore. L'implantation d'une capacité de production photovoltaïque de 50 TWh suppose que la compétitivité économique soit acquise à court horizon, et non plus seulement la parité avec le prix de l'électricité. Cette hypothèse est probable vu la baisse du coût des cellules photovoltaïques. On peut aussi remarquer que les rythmes en vigueur en Allemagne sont du même ordre.

# Les virus géants

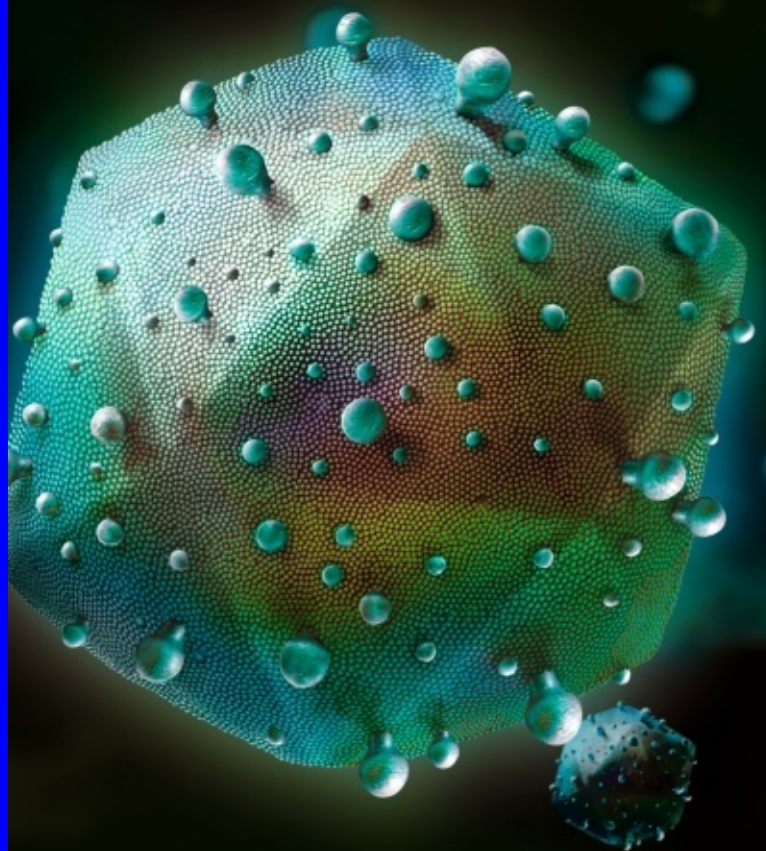
## Une nouvelle forme de vie ?

Trop petits pour être vus à l'œil nu, les virus optiques, dépourvus de métabolisme, les virus que l'on connaissait depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle sont vus comme des parasites inanimés et non comme des organismes vivants. Munis d'une poignée de gènes, ils sont juste capables de détourner à leur profit l'appareil génétique de la cellule qu'ils infectent pour lui faire produire d'autres particules virales identiques.

La découverte récente de virus plus gros que certaines bactéries, en particulier *Mimivirus* en 2003 et *Megavirus* en 2010, bouleverse ce tableau (voir page 22). Ce n'est pas une pure question de taille. Les virus géants ont plusieurs centaines à plus d'un millier de gènes, beaucoup plus que nécessaire pour un simple détournement du noyau de la cellule hôte. Ils contiennent aussi diverses protéines, enzymes et séquences d'ARN. Et surtout, ils ne font pas appel à l'appareil génétique de la cellule infectée pour se répliquer : ce processus a lieu dans le cytoplasme de la cellule, en utilisant seulement les ribosomes et les nutriments de l'hôte (voir page 30).

Ce mode de réplication plus indépendant et le fait que, contrairement au cas des virus classiques, la plupart des gènes des virus géants ne proviennent pas d'autres organismes connus posent en des termes nouveaux la question de l'origine des virus et de leur appartenance ou non au monde vivant. On espère de nouvelles découvertes pour nourrir le débat. En particulier, des missions d'exploration telles que *Tara Oceans* ont récemment montré que le monde des virus aquatiques, auquel appartiennent les virus géants, est d'une richesse insoupçonnée et qu'il joue un rôle de premier plan dans la biosphère (voir page 34). Ces missions océaniques pourraient bien apporter un grand nombre de nouveaux virus géants, et leurs résultats sont donc attendus avec impatience.

La rédaction



**VUE D'ARTISTE** du virus *Env1*, qui infecte l'algue unicellulaire *Emiliania huxleyi*. Son ADN est composé de 407 000 paires de bases et coderait plus de 450 protéines. Son diamètre, près de 0,2 micromètre, est plusieurs fois supérieur à celui de certains autres virus géants.

# Les virus

James Van Etten

## L'ESSENTIEL

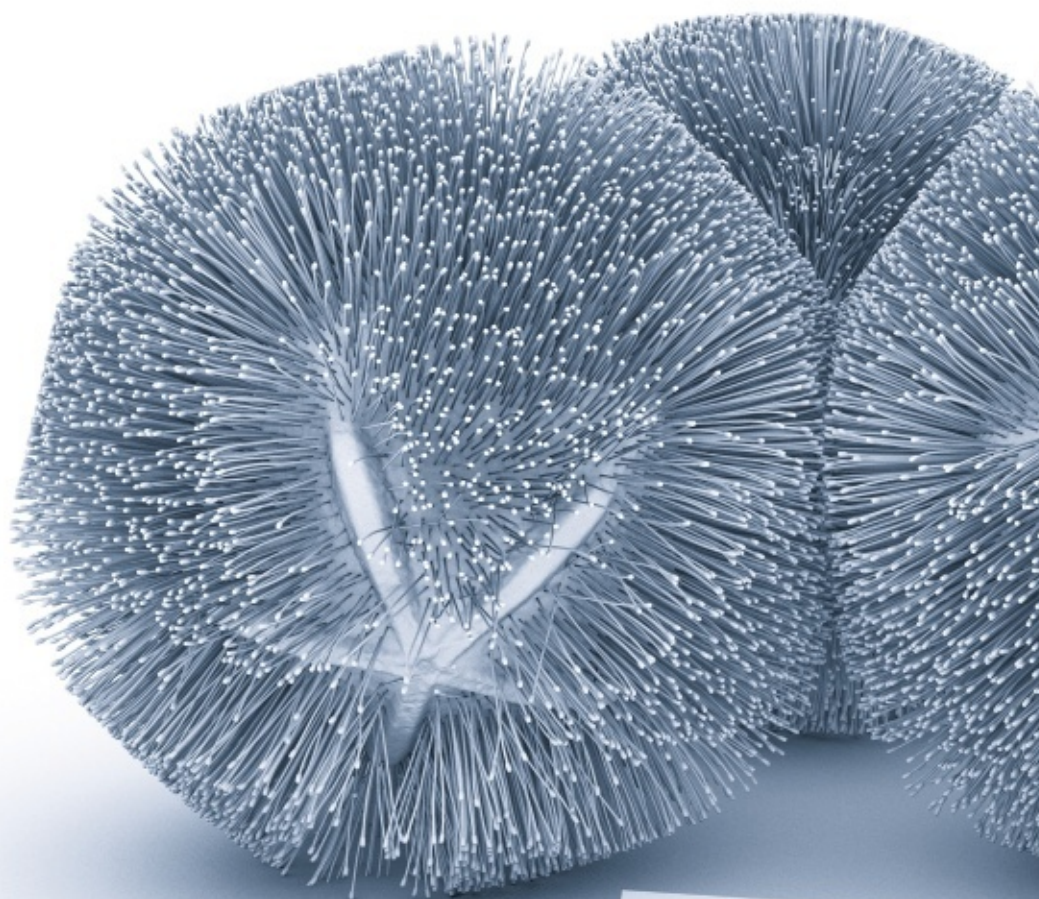
✓ Plusieurs virus de grande taille ont été découverts au cours des dix dernières années, et l'on soupçonne l'existence de très nombreux autres.

✓ Ces virus ont un grand nombre de gènes, dont la plupart n'ont pas d'équivalents connus chez d'autres organismes.

✓ Certains des virus géants jouent un rôle écologique et environnemental important.

✓ L'origine des virus géants et leur parenté avec les diverses branches du vivant restent fortement débattues.

Campbell Strong et Gaël McGill, Digizyme Inc. ([www.digizyme.com](http://www.digizyme.com))



Mimivirus

Rhinovirus



# g géants

La découverte récente de virus plus gros  
que certaines bactéries bouleverse  
notre conception de la nature des virus  
et de l'histoire de la vie.

Selon le concept classique, un virus ressemble à un minuscule cambrioleur : il pénètre furtivement dans une cellule vivante, s'empare des commandes de la biosynthèse et contraint la cellule à lui fabriquer un grand nombre de descendants. Ces derniers s'échappent ensuite de leur hôte et vont perpétuer dans d'autres cellules le cycle de réplication. Les virus sont supposés très petits par rapport à la taille des cellules, qui est de l'ordre du micromètre (un millième de millimètre, ou 1 000 nanomètres), et se contenter de quelques gènes bien adaptés.

Cette vision a volé en éclats à partir des années 2000, avec la découverte de virus aussi gros que des bactéries et dotés de caractéristiques qui les distinguent nettement des virus ordinaires, notamment un génome de grande taille contenant plusieurs centaines de gènes. Ces virus géants ont ouvert un nouveau domaine de recherche aux biologistes, dont les idées sur la frontière entre les virus et le vivant, ainsi que sur l'origine des virus, se voient remises en question.

**1. CERTAINS VIRUS** récemment découverts, tel *Mimivirus*, sont géants par rapport à d'autres, tels les rhinovirus (responsables des rhumes et rhinites) et le VIH (le virus du sida).

L'histoire remonte à 1992. Cette année-là, on découvrit un nouveau micro-organisme provenant d'une tour de refroidissement d'une centrale électrique à Bradford, en Angleterre. Timothy Rowbotham, microbiologiste au Laboratoire de santé publique de Leeds, recherchait l'agent responsable d'une épidémie locale de pneumonie. Ses investigations le conduisirent vers les eaux chaudes de cette tour de refroidissement ; un tel milieu est un réservoir bien connu de bactéries pathogènes d'origine humaine, responsables de la légionellose, une forme grave de pneumonie.

## Des parasites dans une amibe

Les parasites présentes dans l'échantillon ont dans un premier temps été prises pour des bactéries. La microscopie les révélait à l'intérieur d'amibes de la espèce *Acanthamoeba polyphaga*, qui se nourrissent en ingérant bactéries et autres microparticules. Mais le génome de ces entités s'est révélé très différent de celui des bactéries. Onze ans plus tard, en 2003, les travaux de Didier Raoult, Jean-Michel Claverie et leurs collègues, à l'Université de Méditerranée à Marseille, éclaircissent la question : ces organismes



mystérieux sont des virus géants, auxquels on donna un nouveau nom, *Acanthamoeba polyphaga Mimivirus*, le terme *Mimivirus* étant la contraction de *Microbe mimicking virus*, c'est-à-dire virus imitant un microbe.

## Un virus qui mesure près d'un micromètre

*Mimivirus* était alors le plus grand virus jamais découvert. On connaissait de gros virus depuis quelques années. La plupart font partie des « grands virus nucléocytoplasmiques à ADN », ou NCLDV (de l'anglais *nucleo-cytoplasmic large DNA viruses*). Ce groupe comprend plusieurs familles. Citons les Poxviridés, qui infectent des vertébrés (tel le virus de la variole) et des invertébrés, les Iridoviridés et Ascoviridés, qui parasitent des insectes et des vertébrés (comme froid, les Phycodnaviridés, des virus aquatiques dont les hôtes sont des algues vertes, et les Asfarviridés, des virus de mammifères.

On considère comme géants les virus dont le génome a plus de 300 000 paires de bases et dont la capsid (l'enveloppe du virus, formée de protéines) mesure environ 0,2 micromètre ou plus. *Mimivirus*, dont le diamètre atteint environ 0,75 micromètre, est un géant parmi les virus géants. Son génome comporte plus de 1,182 million de paires de bases et code 1 018 protéines, des chiffres énormes selon les normes virales. *Mimivirus* s'est d'ailleurs été détrôné en 2010 par *Megavirus chilensis*, un virus géant

découvert dans les eaux chiliennes par l'équipe de J.-M. Claverie : *Megavirus chilensis* a une taille supérieure de dix pour cent à celle de *Mimivirus*, et son génome est formé de 1,259 million de paires de bases, pour 1 120 protéines codées.

Pour comparaison, la plus petite bactérie vivant à l'état libre, *Mycoplasma genitalium*, ne mesure que 0,45 micromètre, a un génome de taille moitié de celui de *Mimivirus* et ne code que 482 protéines. Et l'organisme cellulaire le plus petit connu, *Hodgkinia cicadicola*, une bactérie parasite de certaines cigales (décrite en 2007), a un génome de seulement 140 000 paires de bases, qui ne code que 169 protéines.

**Les virus géants ont une taille supérieure à 0,2 micromètre et leur génome comporte plus de 300 000 paires de bases.**

La plupart des virus géants n'ont été découverts et caractérisés que ces toutes dernières années. L'une des principales raisons est que, pour isoler les particules virales, on utilise généralement des filtres dont les pores mesurent 0,2 micromètre. En pratique, les virus sont définis comme des agents qui se répliquent et qui passent à travers de tels filtres. On comprend donc

que l'on n'avait pas détecté de virus plus gros que la porosité des filtres.

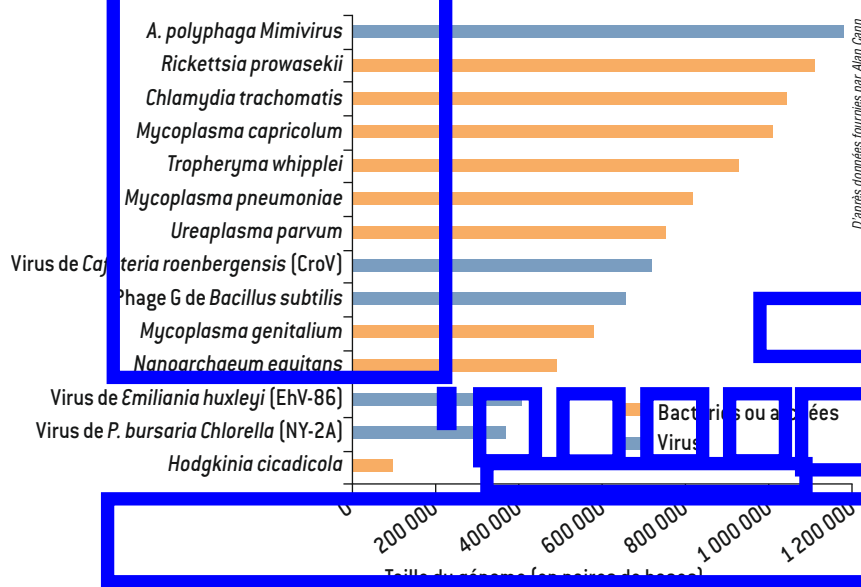
Par ailleurs, les méthodes habituelles de culture ne permettaient pas de mettre en évidence la présence de virus géants, car ces grosses particules s'enfonçaient dans la gélose molle servant de milieu de culture aux bactéries et autres organismes hôtes, ce qui les empêchait de se disséminer et de former des plaques visibles. Une autre explication du caractère insaisissable des plus grands virus est que beaucoup d'entre eux infectent des protistes, organismes unicellulaires qui attirent beaucoup moins l'attention que les végétaux et les animaux.

Les projecteurs étant aujourd'hui enfin braqués sur eux, les virus géants offrent un nouveau terrain d'exploration : quelle est l'origine de ces surprenants agents ? Quelle est leur structure ? Par quels mécanismes se répliquent-ils ? Quelle est leur place dans le monde vivant ? Quel rôle y jouent-ils ? Les biologistes ne font que commencer à répondre à ces questions.

*Mimivirus* est bien représentatif des virus géants. Son virion – la particule qui regroupe les éléments structuraux du virus, en particulier son matériel génétique et la coque de protéines – a un cœur à peu près icosaédrique d'environ 500 nanomètres (un icosaèdre est un polyèdre constitué de 20 faces triangulaires). Ce cœur est chevelu : il est recouvert par un ensemble dense de fibrilles radiales longues d'environ 140 nanomètres. Les scientifiques n'ont pas encore complètement caractérisé les fibrilles, mais la présence dans le génome de *Mimivirus* de gènes semblables à ceux permettant la synthèse des parois bactériennes suggère qu'elles pourraient être de constitution voisine. *Mimivirus* et *Megavirus* sont les seuls NCLDV que l'on connaisse munis de cette enveloppe de fibrilles.

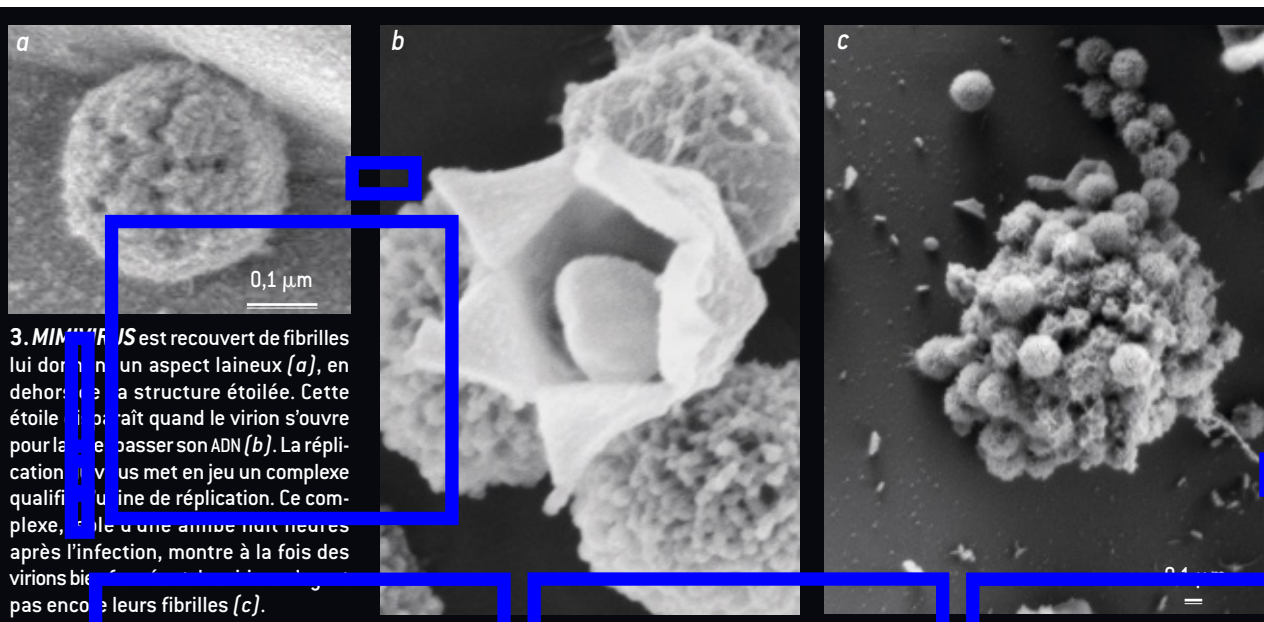
Autre particularité du virion de *Mimivirus* : l'un des sommets de la capsid icosaédrique présente une structure proéminente en forme d'étoile à cinq branches (voir les figures 1, 3 et 4). Cette structure a un rôle central dans le processus d'infection de la cellule.

Quand une amibe ingère un *Mimivirus*, ce dernier pénètre dans la cellule à l'intérieur d'une vacuole, compartiment bordé d'une membrane, qui fusionne avec des lysosomes, des organites digestifs. C'est probablement l'activité des enzymes lysosomales qui provoque l'ouverture de la structure en étoile du virion. Il semble qu'ensuite, une membrane interne au



D'après données fournies par Alan Cam

**2. LES GÉNOMES DES VIRUS GÉANTS** peuvent être plus grands que ceux de certaines bactéries. Ces génomes sont beaucoup plus riches en gènes. Ainsi, dans le cas de *Mimivirus*, 86 pour cent de ses séquences codantes des protéines n'ont pas de gènes homologues connus dans les génomes cellulaires.



**3. MIMIVIRUS** est recouvert de fibrilles lui donnant un aspect laineux (a), en dehors de sa structure étoilée. Cette étoile disparaît quand le virion s'ouvre pour laisser passer son ADN (b). La répllication du virus met en jeu un complexe qualifié d'usine de répllication. Ce complexe, visible une année plus tard après l'infection, montre à la fois des virions bien assemblés et d'autres qui n'ont pas encore leurs fibrilles (c).

*Mimivirus* fusionne avec la membrane de la vacuole qui l'entoure, le génome du virus étant ainsi directement injecté dans le cytoplasme de l'hôte, avec de nombreuses autres protéines contenues dans la capside. Un complexe d'assemblage viral, nommé usine de répllication, se forme alors dans le cytoplasme autour de cette capside virale dénudée. Cette usine de répllication s'agrandit au point que, six heures après le début de l'infection, elle occupe une grande partie du volume cellulaire.

Au sein de l'usine de répllication, des capsides virales vides, partiellement assemblées et dépourvues de fibrilles, sont synthétisées – selon des mécanismes qui restent à élucider – et incorporent en leur sein de l'ADN. Curieusement, cette encapsidation de l'ADN se produit à travers des faces de la capside virale ne faisant pas partie de la structure étoilée. Autrement dit, l'entrée de l'ADN dans le virion et sa sortie hors du virion s'effectuent à travers des portes différentes, ce qui est une première pour un virus. Une fois les virions assemblés, la cellule, pleine d'environ 1 000 virus matures, se désagrège : les particules virales sont désormais libres d'infecter d'autres cellules et de répéter le cycle.

En 2008, les virus géants créèrent une nouvelle surprise. D. Raoult et ses collègues mirent au jour une nouvelle souche de *Mimivirus* en cultivant des amibes dans de l'eau provenant d'une tour de refroidissement paillonnaise. Dotée d'un génome légèrement plus grand que *Mimivirus*, cette nouvelle souche fut dénommée *Mamavirus*. Mais, contrairement à ce qu'on attendait, elle

*Mamavirus* pouvait lui-même être infecté par un virus parasite, qui a reçu le nom de *Sputnik*. En d'autres termes, on venait de découvrir le premier virus de virus.

Il ne s'agit pas de virus satellites : assez fréquents, ces derniers sont des agents infectieux constitués de petites quantités d'acide nucléique (ADN ou ARN) et dont la répllication nécessite la présence, dans la cellule infectée, du génome d'un autre virus. Dans le cas de *Mamavirus*, le virus compagnon *Sputnik* semble ne pas être juste un satellite, mais un véritable parasite de l'usine de répllication.

## Des virus eux-mêmes infectés par un virus

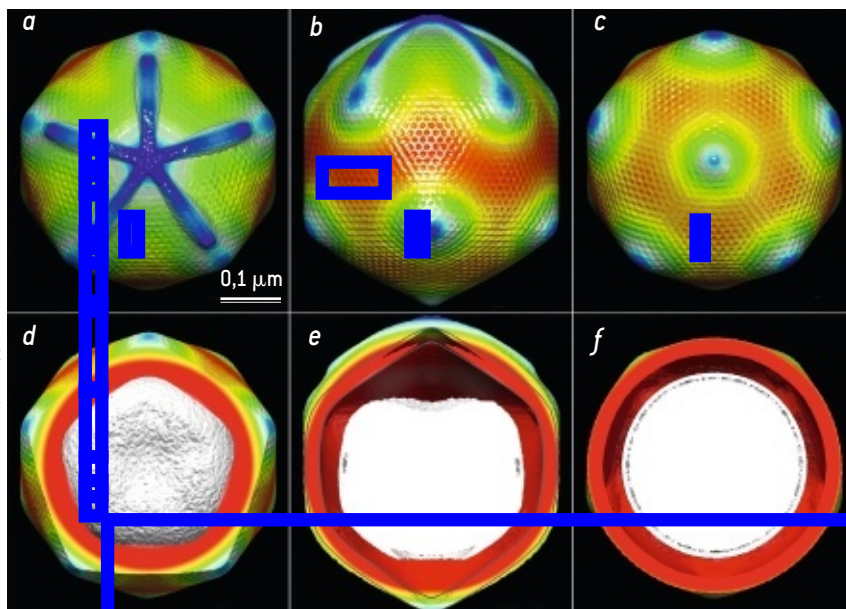
*Sputnik* modifie en effet le pouvoir infectieux de *Mamavirus* dans les amibes. Il semble provoquer la formation de virions de *Mamavirus* défectueux, ce qui n'est pas le cas pour les virus satellites ordinaires. Cette propriété inédite et d'autres caractéristiques de son mode de vie ont conduit à proposer un nouveau groupe et un nouveau nom, *Virophages*, pour désigner les virus qui parasitent des virus géants (par analogie aux bactériophages, terme qui désigne les virus infectant les bactéries).

En avril 2011, Mathias Fischer et Curtis Suttle, de l'Université de Colombie-Britannique à Vancouver, publièrent la découverte d'un nouveau virophage nommé *Mavirus*, parasite du virus géant CroV qui infecte, lui, un protiste de l'espèce *Cafeteria roenbergensis*.

Où est la place des virus géants dans le monde vivant et son évolution ? La présence de nombreuses familles de gènes, inconnues auparavant chez les virus, est au cœur de cette question. Une reconstitution de l'évolution des NCLDV, publiée en 2010 par Eugene Koonin et Natalya Yutin, des Instituts américains de la santé à Bethesda, suggère l'existence d'un ancêtre commun aux virus de ce groupe. Cet ancêtre était vraisemblablement doté d'un petit ensemble de 47 gènes ayant laissé des traces dans les génomes viraux actuels.

À mesure de leur évolution, les NCLDV ont perdu des gènes, en ont dupliqué d'autres et en ont acquis certains de leurs hôtes ou d'autres organismes. Les virus géants, comme les autres virus, sont en quelque sorte des pickpockets génétiques qui s'approprient des gènes de leurs hôtes au fil des âges.

L'interprétation des reconstitutions phylogéniques virales est donc un véritable casse-tête. Une esquisse grossière de l'histoire évolutive se dessine cependant. L'analyse de 45 virus géants a permis d'identifier cinq gènes communs à tous les virus NCLDV et 177 autres gènes qui sont partagés par au moins deux des familles de virus NCLDV. Le signal génétique ancien est toutefois très faible. Par exemple, pour trois virus choisis au sein de la famille des Phycodnaviridés, on a seulement 14 gènes communs indiquant une histoire évolutive partagée, alors que leurs génomes regroupent au total plus de 100 000 gènes.



**4. UNE RECONSTRUCTION DE LA STRUCTURE DU MIMIVIRUS** sans les fibres, d'après des images de cryomicroscopie électronique, sous trois angles différents (d, e, f sont des vues en coupe). Les couleurs traduisent la distance radiale à partir du centre du virus : gris entre 0 et 180 nanomètres, rouge entre 180 et 210 nanomètres, couleurs de l'arc-en-ciel entre 210 et 250 nanomètres.

Quant à l'origine du groupe des NCLDV, elle est controversée. Lors de la découverte de *Mimivirus*, certains chercheurs, constatant qu'un nombre gigantesque (80 pour cent) de ses gènes ne présentent aucune ressemblance notable avec des gènes d'organismes cellulaires, ont conclu que l'on devait considérer les NCLDV comme une quatrième branche du vivant, à côté des archées, des bactéries et des eucaryotes (organismes à cellules pourvues d'un noyau). On a ainsi suggéré que certains gènes des NCLDV proviendraient du même patrimoine génétique ancestral que celui dont sont issus les procaryotes et les eucaryotes.

## Une origine à éclaircir

Dans ce cadre, étant donné la taille et la complexité des génomes des NCLDV, deux hypothèses distinctes ont été émises : soit l'ancêtre des NCLDV actuels a donné naissance au génome des eucaryotes, soit le génome de la famille des NCLDV est issu de la dégradation du génome d'un eucaryote ancestral. Un transfert de gènes horizontal entre virus et hôte a également joué un rôle important dans l'évolution des NCLDV (et de leurs cellules hôtes), dès les débuts de l'histoire biologique.

Au vu de la spécificité morphologique, écologique et génétique des virus géants, il a été proposé de les nommer

*girus*. Plus de plus d'un siècle, le terme *virus* (qui signifie poison pour les Grecs) a perdu peu à peu de sa généralité avec la découverte d'une immense diversité d'agents viraux ayant des modes de vie, des physiologies et des stratégies de répllication très différents.

La caractérisation de nouveaux acteurs biologiques passe notamment par l'examen de leur rôle dans le modelage de leur environnement. Ces dernières années, le champ émergent de la métagénomique a ouvert une nouvelle fenêtre pour la compréhension des écosystèmes. De quoi s'agit-il ? Le métagénome d'un environnement est l'ensemble de tous les génomes des organismes présents dans cet environnement. Pour le déterminer, on utilise une technique globale de séquençage (*shotgun sequencing*) : on collecte un échantillon de l'environnement étudié, puis on coupe au hasard l'ADN qu'il contient. Les fragments résultants sont séquencés, et les séquences qui se recouvrent sont alors alignées pour reconstituer des gènes. Certains des gènes résultants peuvent être identifiés en se référant à des bases de données génétiques.

Les études de métagénomiques révèlent un nombre très élevé de gènes non identifiés. À ce jour, on ne connaît que, on se retrouve dans une position bien particulière : nous savons que le nombre d'espèces inconnues est très grand.

L'étude de métagénomique publiée en 2002 par Mya Breitbart et Forest Rohwer, à l'Université de l'État de San Diego, avec leurs collègues, a ainsi montré que 200 litres d'eau de mer contiennent plus de 5 000 virus différents, pour la plupart d'espèces inconnues.

## Des gènes inconnus

Dans une autre étude, la mission américaine *Global Ocean Sampling Expedition* a échantillonné des eaux depuis la Nouvelle-Écosse jusqu'au Pacifique Est au cours d'une circumnavigation de deux ans, entre 2004 et 2007. Dans 86 pour cent des sites échantillonnés, les formes apparentées à *Mimivirus* étaient les entités les plus abondantes après les bactériophages. Les *girus* sont ainsi répandus dans la nature et il est clair que l'on peut s'attendre à en découvrir beaucoup d'autres.

Le rôle des *girus* dans le façonnage de leur environnement s'éclaircit aussi. Plus de la moitié de toute la photosynthèse sur la Terre est assurée par des micro-organismes photosynthétiques, dont les cyanobactéries et les microalgues, désignées collectivement sous le nom de phytoplancton. On estime qu'à tout moment, 20 pour cent de toutes les cellules du phytoplancton sont infectées par des virus, ce qui inclut des virus géants en quantités inconnues mais manifestement importantes.

Un élément capital pour l'écologie des systèmes océaniques et de la Terre est le microzooplancton qui se nourrit du phytoplancton. À ce jour, un seul virus est connu pour infecter un tel protiste ; il s'agit du virus de *Cafeteria roenbergensis*, ou CroV – un virus géant ayant 730 000 paires de bases et 514 gènes qui codent des protéines (comme on l'a mentionné précédemment, CroV a un virophage associé).

Le phytoplancton est intimement lié à un autre virus géant, qui a un vaste impact sur l'environnement marin, terrestre et atmosphérique. *Emiliania huxleyi* est une algue photosynthétique unicellulaire parmi les plus abondantes. Sa cellule produit de minuscules écailles de carbonate de calcium, un composé qui, étant donné l'abondance de ces microalgues, joue un rôle important dans le cycle du carbone de l'océan. *E. huxleyi* est sujette à des proliférations périodiques et forme de gigantesques nappes pouvant s'étendre sur 100 000 kilomètres carrés. Un virus géant qui infecte *E. huxleyi*, nommé *EmmV* (187 000 paires

res de bases, 472 séquences codantes prédites), est en grande partie responsable de la fin de ces proliférations (voir l'illustration de couverture de ce numéro). En mourant, ces efflorescences de *E. huxleyi* libèrent de grandes quantités de matière organique, incluant des écaillés de carbonate de calcium détachées, qui forment de vastes dépôts. Les falaises blanches de Douvres en sont un exemple frappant.

La fin d'une efflorescence de *E. huxleyi* entraîne aussi la libération d'une substance chimique dont l'altération par d'autres microorganismes produit de grandes quantités de diméthylsulfure, ou  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ . Ce composé est responsable de l'odeur que nous associons à l'eau de mer. Lorsque le diméthylsulfure atteint l'atmosphère, il contribue à la formation de nuages et de la pluie. Ainsi, l'infection de la microalgue *E. huxleyi* par l'ENV joue un rôle

dans l'écologie, la géologie et le climat de son environnement.

Abrotons à présent le lien éventuel entre les virus géants et l'homme. Les particules de *Mimivirus* dans les échantillons provenant de Bradford ont été découvertes parmi des bactéries susceptibles de provoquer une pneumonie. On a donc voulu savoir si *Mimivirus* pourrait être pathogène pour l'homme.

À première vue, il est fort improbable qu'un agent pathogène des amibes puisse faire le « grand saut » vers l'homme, séparé des amibes par 800 millions d'années d'évolution. Les infections virales sont en général très spécifiques des hôtes. Cette spécificité résulte de l'obligation pour un virus de prendre le contrôle de la machinerie de synthèse de la cellule hôte afin de se répliquer. Tout cela nécessite des interactions macromoléculaires nombreuses,

## L'AUTEUR



James VAN ETTEN est professeur de pathologie végétale à l'Université du Nebraska à Lincoln, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

## Les virus appartiennent-ils à l'arbre du vivant ?

Les virus sont-ils des êtres vivants ? C'est un vieux débat, qu'a relancé la découverte des virus géants. Dès 2006, Jean-Michel Claverie, à Marseille, écrivait que l'usine du virus devrait être considérée comme le véritable organisme viral quand on parle d'un virus et que, « dans cette interprétation, la nature vivante des virus est incontestable, au même niveau que les parasites bactériens intracellulaires ». Le virion ne serait alors qu'une forme reproductrice, une étape dans la « vie » d'un virus avant qu'il ne revêtisse de l'appareil métabolique d'une cellule hôte, dirige la copie et se lance dans sa propre reproduction, comme toute autre forme de vie unicellulaire.

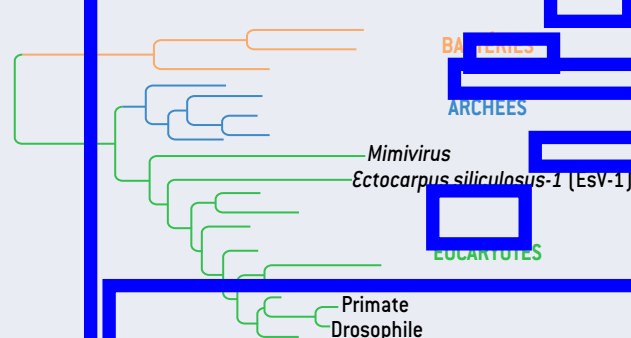
En 2007, David Moreira et Purificación López-García, au Laboratoire Écologie, systématique et évolution, à Orsay, ont rediscuté de cette question dans *Nature Reviews Microbiology*. Selon eux, non seulement les virus ne sont pas vivants, mais ils n'ont aucune place dans un quelconque arbre phylogénétique reliant les organismes actuels à l'ancêtre commun de tous les êtres vivants.

Les virus de l'arbre de la vie, D. Moreira et P. López-García affirmaient notamment que leurs gènes sont

volés, qu'il n'existe pas un seul gène partagé par tous les virus (pas de lignée virale ancestrale), que les virus sont polyphylétiques (ils n'ont pas d'ancêtre commun et apparaissent ici et là dans l'arbre évolutif en empruntant des gènes à leurs hôtes).

Le débat, animé, s'est poursuivi dans un autre numéro de la même revue. Entre autres, J.-M. Claverie et son collègue Hiroyuki Ogata ont critiqué le rejet des virus du domaine vivant en raison de leur polyphylétisme en se focalisant sur les virus géants. Ils faisaient observer qu'il n'est pas pertinent de considérer les virus comme de simples voleurs de gènes de l'hôte quand 86 pour cent des gènes de *Mimivirus* ne ressemblent à aucun gène cellulaire connu. En outre, ils présentaient un arbre phylogénétique d'une protéine de réplication de l'ADN dans lequel *Mimivirus* et un autre virus géant, nommé ECV-1, bifurquaient manifestement très près de l'endroit où l'arbre du vivant se ramifie en trois domaines (voir la figure ci-dessus).

En réponse, D. Moreira et P. López-García ont exhibé un arbre fondé sur un plus grand nombre d'homologues de gènes provenant d'hôtes de *Mimivirus* et d'ECV-1, qui



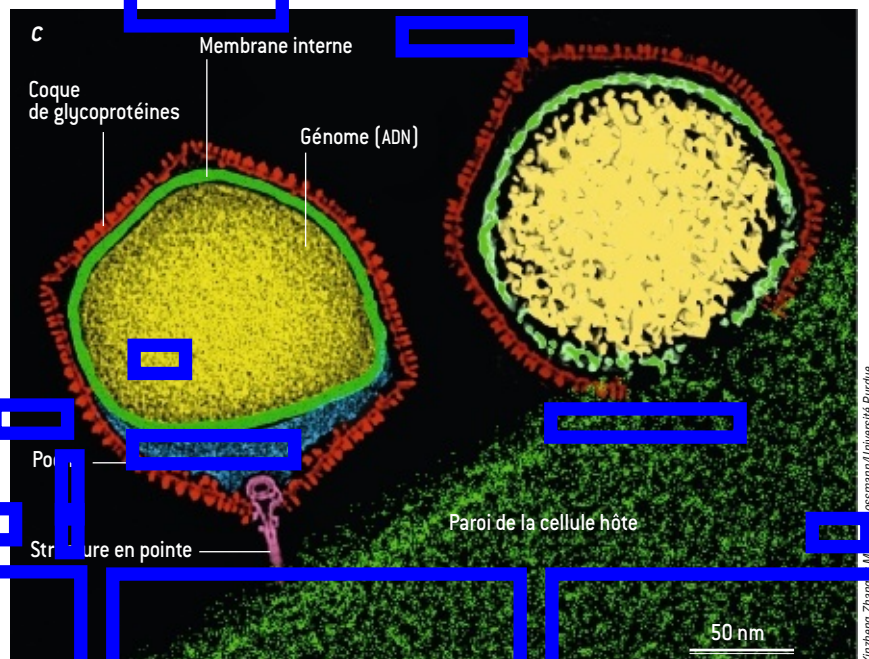
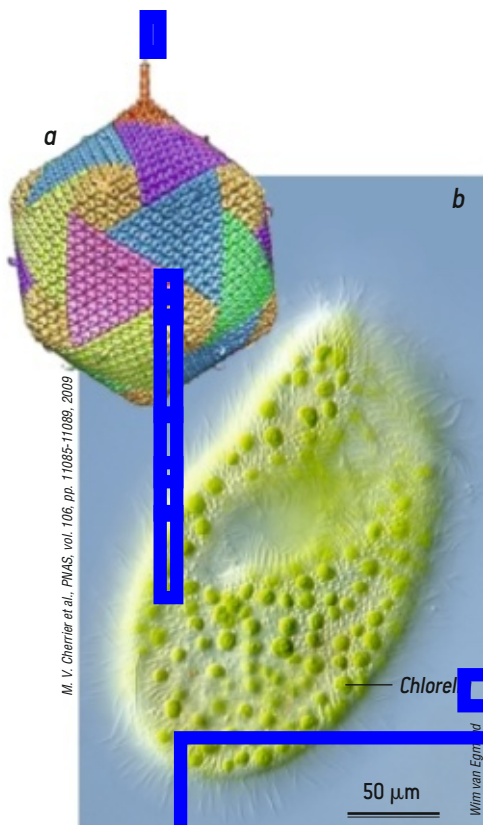
Cet arbre phylogénétique a été présenté par J.-M. Claverie et H. Ogata pour appuyer l'idée que les virus géants doivent être considérés comme une quatrième branche du vivant. Il est fondé sur 20 taxons et représente la position d'un gène de réplication de l'ADN dans *Mimivirus* et dans le virus géant ECV-1. Les branches de ces derniers apparaissent en des temps évolutifs très anciens, à l'époque où les archées et les eucaryotes ont divergé. Mais un arbre plus complexe fondé sur 100 taxons et d'autres séquences homologues du gène de réplication, montre des résultats différents, où la parenté des virus géants n'émerge pas.

seraient les sources probables de transfert horizontal de gènes. D'après cet arbre, le groupe de gènes étudié a des racines dans des groupes d'eucaryotes de parenté éloignée, avant que ceux-ci n'aient été envahis par les virus. Il contredirait donc l'idée d'une quatrième branche de

actuels sont chimériques, « constitués d'une mosaïque de séquences d'origine différentes, qui rend la théorie de l'arbre de la vie obsolète ». L'arbre en fait imaginé par Darwin que s'il est correct, les virus ne peuvent être considérés comme des formes de vie.

De son côté, Didier Raoult, à Marseille, récuse la notion d'arbre du vivant. Selon lui, les organismes

Le dernier mot dans ce débat ? Il reste encore à écrire...



**5. LE VIRUS GÉANT PBCV-1** (a ; les fausses couleurs distinguent les différentes structurations de la surface de sa capside icosaédrique) infecte des *Chlorella*, algues unicellulaires qui vivent en symbiose au sein, notamment, de pro-

tistes (ici *Paramecium bursaria*). Ce virus a plus de 400 gènes et mesure environ 0,2 micromètre. Dans la reconstruction réalisée à partir de vues en microscopie électronique (c), on voit, en coupe et en fausses couleurs, l'an-

crage du virus PBCV-1 à sa cellule hôte (virion de gauche) et le début de sa pénétration (virion de droite) : un trou a été formé dans la paroi de la cellule hôte, et la membrane cellulaire de ce dernier fusionne avec la membrane interne du virus.

complexes et spécifiques, à toutes les étapes de l'infection. Il n'est dès lors pas surprenant que des virus très semblables tels que le VIH, l'agent responsable du sida, et son homologue chez les singes, le VIS, n'infectent pas de façon sélective l'homme et l'homme, bien que ces derniers soient proches parents.

provoque que des maladies bénignes ou qui a très peu de chances d'être disséminé sous forme d'aérosol dans un laboratoire.

Les virus NCLDV géants ont probablement une histoire évolutive très ancienne, mais ils sont parmi les objets les plus nouveaux apparus sur la scène de la virologie. Notons qu'en plus des membres des NCLDV, il existe d'autres virus qualifiés de

## Des virus géants chez l'homme ?

Cependant, *Mimivirus* défie souvent les règles habituelles. Il pénètre dans les cellules phagocytaires (telles que les amibes et, peut-être, les macrophages humains) quand ces organismes l'englobent. Après avoir été ingéré, le virus sort de la vacuole qui l'entoure par une fusion de membranes relativement non spécifique. À partir de là, son énorme génome pourrait lui conférer la capacité de détourner ou de répliquer des fonctions cellulaires, bien au-delà de la capacité des virus moins riches en gènes.

Mais il n'existe pas d'indices suggérant que *Mimivirus* pourrait être pathogène pour l'homme. Selon une revue de synthèse parue en 2009, la ligne de conduite la plus prudente consiste à traiter provisoirement *Mimivirus* comme un pathogène de classe 2 pour la biosécurité, c'est-à-dire un agent qui ne

provoque que des maladies bénignes ou qui a très peu de chances d'être disséminé sous forme d'aérosol dans un laboratoire.

Mais les virus géants peuvent aussi avoir des retombées positives. Ainsi, on découvre de nouvelles enzymes ayant parfois une valeur commerciale, et les enzymes viraux sont souvent les plus petites dans leur classe, ce qui en fait de parfaits modèles pour étudier les structures et mécanismes enzymatiques. L'étude des virus géants est donc riche de promesses, tant sur le plan de la biologie fondamentale que sur le plan des applications.

Ce domaine connaîtrait des progrès plus rapides si l'on pouvait modifier génétiquement les virus géants par des techniques moléculaires. Les scientifiques n'y sont pas encore parvenus. Espérons que cette barrière tombera bientôt.

## BIBLIOGRAPHIE

J. L. Van Etten et D. D. Busse. Chloroviruses: not your everyday plant virus. *Trends in Plant Science*, vol. 17(1), pp. 1-8, 2012.

P. Forterre. Giant viruses: Conflict in revisiting the virus concept. *Interferology*, vol. 53, pp. 362-378, 2010.

J. L. Van Etten et al. RNA viruses: The really big ones (girus), *Annual Review of Microbiology*, vol. 64, pp. 13-99, 2010.

J.-M. Claverie et C. Abad. Mimivirus and its virophage, *Annual Review of Genetics*, vol. 43, pp. 10-66, 2009.

Correspondance, *Nature Reviews Microbiology*, vol. 7, pp. 615-625, 2009.

puf

POUR LA  
**SCIENCE**



Depuis quinze ans, *Le Monde* soutient les jeunes chercheurs et la recherche.

Lancé en 1997, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire entend valoriser les travaux de jeunes chercheurs francophones susceptibles d'influencer notre environnement scientifique, économique, social et/ou artistique.

Cette année, à l'issue du concours présidé par le philosophe Edgar Morin pour les sciences humaines et sociales et par l'académicien Pierre Léna pour les sciences exactes, ce prix offrira la possibilité à cinq docteurs récemment diplômés en sciences humaines de publier leur thèse aux Presses universitaires de France et à cinq docteurs en sciences exactes de publier un résumé de leurs travaux dans *Pour la Science* et dans un ouvrage publié aux Éditions Le Pommier.

Par ailleurs le quotidien *Le Monde* présentera l'ensemble de ces thèses.

15<sup>e</sup>  
édition

## PRIX *Le Monde* DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

Pour sa quinzième édition, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire est ouvert aux :

**Docteurs en sciences humaines et sociales** ayant soutenu leur thèse entre le 31 octobre 2010 et le 31 décembre 2011. Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 31 mai 2012.

**Docteurs en sciences de la matière ou de la vie, fondamentales ou appliquées** ayant soutenu leur thèse entre le 31 octobre 2010 et le 31 décembre 2011. Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 31 mai 2012.

RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES  
ET INSCRIPTIONS

Site internet : [www.lemonde.fr/prix-recherche/](http://www.lemonde.fr/prix-recherche/)

Email : [prixrecherche@lemonde.fr](mailto:prixrecherche@lemonde.fr)

Cette année, une attention particulière sera portée aux travaux de recherche universitaire innovants, qui proposeront des solutions concrètes de nature à simplifier la vie quotidienne du grand public.

A l'un d'eux, sera décernée une « mention spéciale Google ».

**Le Monde**

Google

FONDATION  
CREDIT COOPERATIF  
FONDATION D'ENTREPRISE

 Fondation Charles Léopold Mayer  
pour le Progrès de l'Homme

# Les virus

## géants vestiges d'organismes cellulaires ?

Jean-Michel Claverie et Chantal Abergel

Les virus géants tels que *Mimivirus* et *Megavirus* constituent des microbes d'un type nouveau.

Ils ne se répliquent pas comme les virus classiques, en prenant le contrôle du noyau de la cellule hôte.

La découverte de virus géants, dont le diamètre atteint presque le micromètre, est toute récente. Il en est ainsi de *Mimivirus*, mis en évidence en 2003 au cours d'une collaboration de notre laboratoire avec celui dirigé par Didier Raoult à l'Université d'Aix-Marseille, et de *Megavirus chilensis* (voir la figure 1), que nous avons rapporté des côtes chiliennes en 2010. Le grand intérêt de ces virus, qui parasitent des organismes unicellulaires, ne réside pas dans leur taille – ou du moins pas directement. Ils passionnent les biologistes parce qu'ils apparaissent comme des microbes d'un type nouveau. Comme nous allons l'expliquer, les Mégaviridés, le groupe de virus géants tels que *Mimivirus* et *Megavirus*, remettent en cause la frontière qui, pensait-on, séparait les virus des organismes vivants. Ils réorientent de ce fait les réflexions sur la nature biologique des virus et sur leur origine.

La grande taille des virus géants n'est pas, en soi, leur caractéristique la plus intéressante. Mais c'est à cause du diamètre de la capside (la coque virale) que les Mégaviridés tels que *Mimivirus* et *Megavirus* ont été découverts si tardivement. Pour com-

### L'ESSENTIEL

✓ La découverte de virus géants tels que *Mimivirus* et *Megavirus* a été tardive en raison de leur grande taille, paradoxalement.

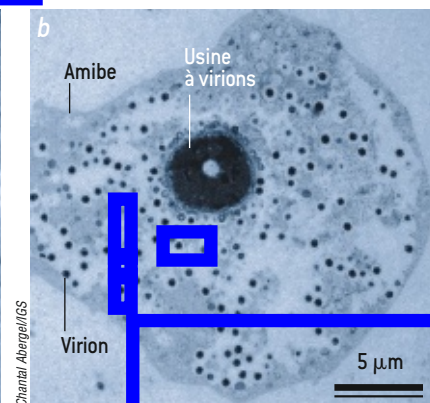
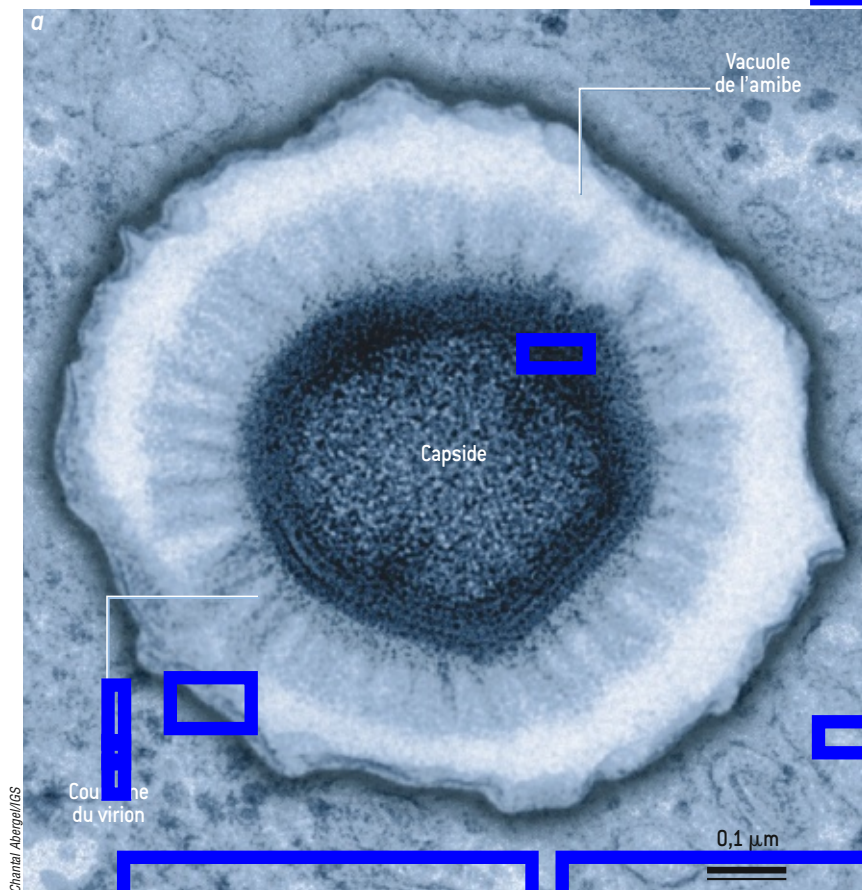
✓ Pour se répliquer, les virus géants, du moins ceux de la famille des Mégaviridés, n'ont pas besoin du noyau cellulaire de l'hôte. Ils forment dans le cytoplasme une « usine virale » qui utilise les nutriments et les ribosomes de l'hôte.

✓ Ils constituent ainsi une nouvelle forme de vie qui remet en question la frontière séparant les virus du monde vivant.

prendre pourquoi, il faut revenir en 1878, l'année où Louis Pasteur émit l'hypothèse que les maladies « infectieuses » d'origine contagieuse, sont dues à des microbes et non à des « miasmes » mal définis comme on le croyait jusqu'alors.

Selon la nouvelle théorie de Pasteur, les agents de maladies infectieuses sont des organismes vivants (car capables de se multiplier *in vitro* dans un milieu nutritif) uniquement visibles au microscope optique. Mais leur taille, de l'ordre du micromètre, suffisait à les retenir sur les filtres de porcelaine, conçus en 1884 par son assistant Charles Chamberland pour désinfecter l'eau destinée à la boisson. Dans les laboratoires de l'époque, la filtration devint ainsi la nouvelle technique de référence pour démontrer qu'une maladie est due à une infection : la simple filtration (du sang, de l'eau, etc.) devait en interrompre la transmission.

Comme souvent en biologie, l'introduction d'une nouvelle technique – ici la filtration – allait conduire à une grande découverte. En 1892, alors que Pasteur était en pleine gloire, un botaniste russe inconnu, Dimitri Ivanovsky, publia dans le Bulletin scientifique de l'Académie impériale



## 1. UNE PARTICULE VIRALE,

ou virion, de *Megavirus chilensis*, le virus au plus grand génome connu (1 259 197 paires de bases, qui codent 1 120 protéines), vue au microscope électronique [a]. Le virion encore intact vient d'être phagocyté par une amibe, et se trouve au milieu d'une vacuole [disque clair]. Il est entouré d'une couronne très résistante dont la composition s'apparente à celle d'une paroi bactérienne. Une dizaine d'heures après l'infection initiale par un seul virion, une boule de près de cinq micromètres de diamètre [b] s'est formée au sein de l'amibe : l'« usine à virions ». De ce micro-organisme transitoire s'échappent une multitude de nouveaux virions de *Megavirus chilensis*, qui finiront par détruire l'amibe.

des sciences de Saint-Petersbourg l'observation fondatrice de la virologie : il avait montré qu'une maladie des plants de tabac, la « mosaïque du tabac », continuait à être transmise malgré la filtration d'un broyat de feuilles malades. Ce premier exemple fut bientôt suivi de nombreux autres (dont la rage et la myxomatose) et il devint alors clair que des agents « filtrables », invisibles au microscope optique, pouvaient aussi être responsables de maladies contagieuses. On les nommera *virus* pour les distinguer des microbes.

La propriété de filtrabilité est restée à la base de la définition opérationnelle des virus, par opposition aux bactéries. Ainsi, la filtration à travers des membranes de porosité égale à environ 0,2 ou 0,3 micromètre est encore souvent la première étape employée pour isoler les virus (et les séparer des bactéries) dans les environnements aquatiques. De tels protocoles ne pouvaient pas, par définition, conduire à la découverte des virus géants dont les particules, plus grosses, restaient piégées sur les filtres, au milieu des bactéries.

Par ailleurs, la taille d'un demi-micromètre est si petite que les virus géants, à savoir qu'ils infectent tous des protozoaires dont la nourriture normale est formée de bactéries ingérées par phagocytose. Or le processus de phagocytose n'est déclenché par une seule particule que si cette dernière a une taille d'environ 0,5 micromètre.

## Une taille bien adaptée

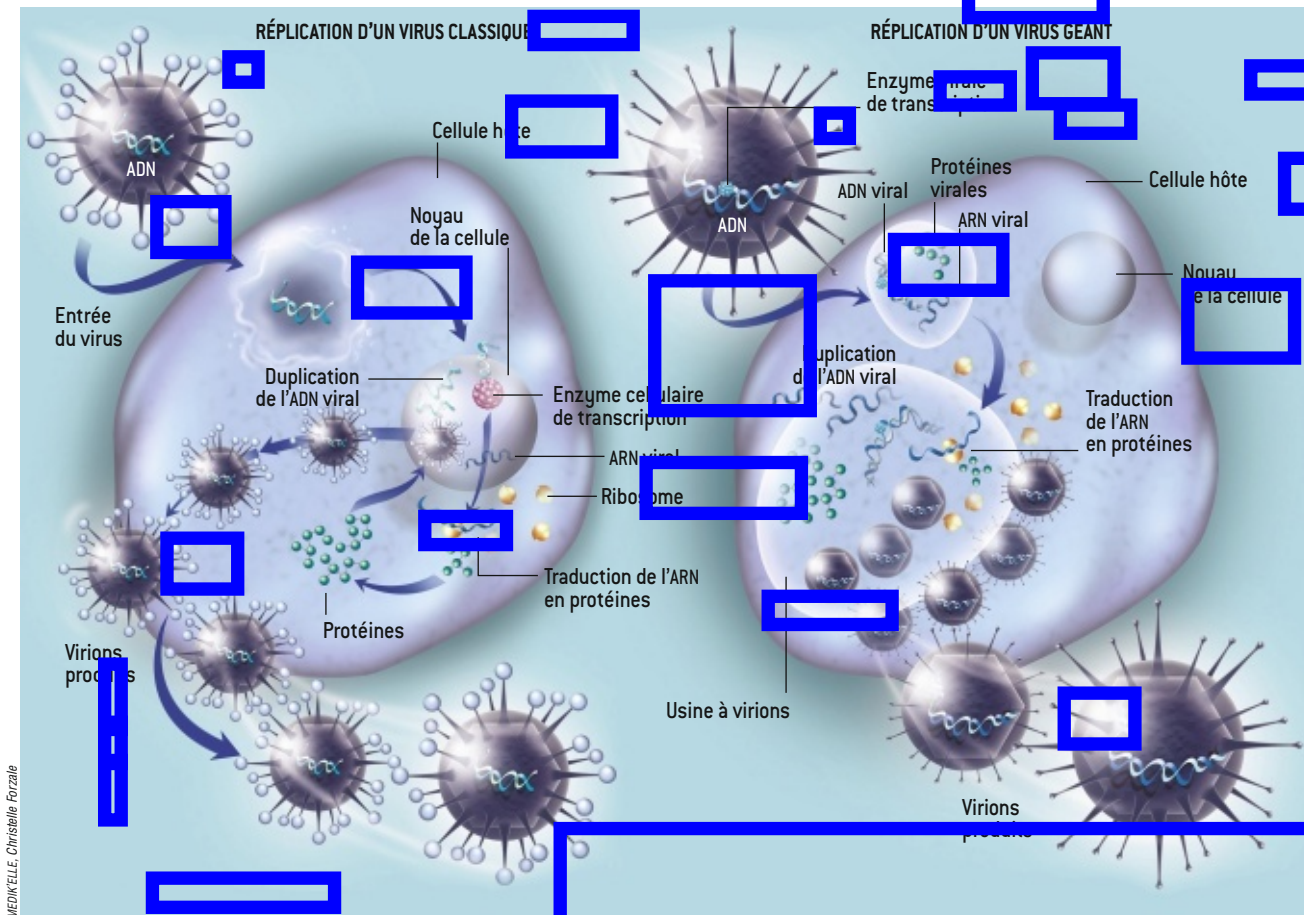
Au-dessous de cette valeur, l'agrégation de plusieurs particules sur la membrane cellulaire est nécessaire pour que la phagocytose se déclenche. Dans un milieu aquatique où les cellules planctoniques et les virus peuvent être présents en très faibles concentrations, la probabilité que deux virus identiques se retrouvent simultanément au contact de la même cellule est donc bien plus faible que celle d'une simple rencontre (cette probabilité est proportionnelle au produit des concentrations). Dans ce contexte, une taille de l'ordre du demi-micromètre est, pour un parasite de protozoaires, un atout.

Qui plus est, *Mimivirus* et son cousin *Megavirus* ont leurs capsides protéiques recouvertes d'une sorte de couronne

épaisse faite de sucres complexes, dont la composition se rapproche de celle de la paroi entourant les bactéries. *Mimivirus* et *Megavirus* ont donc à la fois la taille et le « goût » sucré (détecté par des récepteurs cellulaires de surface) par lesquels les protozoaires sélectionnent leurs proies favorites, les bactéries de l'eau.

C'est donc un scénario d'intoxication alimentaire qui a été sélectionné au fil de millions d'années d'évolution darwinienne : plus le virus ressemble à une bactérie, plus il a de chances d'infecter son hôte, et plus il se multipliera. Ce scénario évolutif est plus particulièrement adapté au milieu aquatique où la taille des particules n'est pas un obstacle à leur dissémination ; il est cohérent avec le fait que c'est dans l'eau qu'ont été trouvés les plus gros virus.

La véritable originalité des virus géants ne tient pourtant pas à la taille de leurs particules, mais à la complexité de leur génome. Beaucoup de virus, parmi les plus pathogènes pour l'homme comme ceux du sida, de l'hépatite B ou du papillome, ont moins de dix gènes, ce qui leur suffit amplement pour proliférer. Un ou deux gènes sont dédiés à la construction de la



MEDIXELLE, Christelle Forzale

## LES AUTEURS



**Jean-Michel CLAVERIE** est professeur à l'Université d'Aix-Marseille et directeur de l'Institut de microbiologie de la Méditerranée (CNRS et Université d'Aix-Marseille), où il dirige le Laboratoire Information génomique et structure (IGS).

**Chantal ABERGEL** est directrice de recherche au CNRS et directrice adjointe du Laboratoire IGS.

## À ÉCOUTER

Jeudi 3 mai  
Jean-Michel Claverie reviendra sur l'histoire de la découverte des virus géants dans la partie « Actualités » d'une émission La marche des sciences spéciale Tara Océans sur France Culture de 14 h à 15 h  
[www.franceculture.com](http://www.franceculture.com)

## 2. UN VIRUS CLASSIQUE SE RÉPLIQUE en prenant le contrôle du noyau de la cellule qu'il infecte.

Les virus géants, du moins ceux de la famille de *Mimivirus* et *Megavirus*, ont un matériel génétique suffisamment complet pour qu'ils se répliquent sans recourir au noyau de la cellule hôte. Dépourvus de ribosomes et de matières premières, ils utilisent ceux contenus dans le cytoplasme de leur hôte pour la synthèse de leurs protéines.

coque qui contient leur génome; les autres gènes réalisent une sorte d'opération commando qui aboutit à la prise de contrôle du noyau de la cellule, dont le métabolisme est alors entièrement détourné vers la production d'une nouvelle génération de virions. Les virus classiques n'ont donc pas besoin de s'encombrer des gènes correspondant aux fonctions déjà disponibles dans les cellules qu'ils infectent.

Cette image du détournement du noyau cellulaire de l'hôte a depuis toujours dominé la virologie. Mais elle n'a plus cours pour les Mégaviridés: leur génome, avec plus d'un millier de gènes, est clairement disproportionné par rapport aux moyens nécessaires à la construction d'un simple capsid et à un assaut de type commando du noyau cellulaire. La réplique de ces virus géants ne s'opère pas au moyen d'une prise de contrôle du noyau de la cellule infectée, mais par la construction *de novo*, dans le cytoplasme

de cette cellule, d'un micro-organisme parasite. C'est à l'intérieur de ce micro-organisme transitoire, dénommé « usine à virions » que va s'exprimer tout le matériel génétique du virus géant, qui code de nombreuses enzymes et un appareil complet de transcription et de réplique de l'ADN (voir la figure 2).

À la manière des bactéries parasites intracellulaires (telles les rickettsies ou les chlamydies), les virus géants ont un métabolisme basé sur l'utilisation de l'énergie (molécule d'ATP) de leur hôte ainsi que des précurseurs nécessaires à la synthèse de leurs protéines (acides aminés) et acides nucléiques (nucléotides). La seule différence avec ces bactéries, mais qui reste pour l'instant une caractéristique absolue du monde viral, est que les virus géants n'ont pas de ribosomes et qu'ils sont donc contraints de sous-traiter la synthèse de leurs protéines au cytoplasme de la cellule infectée.

Toutefois, les biologistes ont découvert des vestiges d'un système de traduction des ARN en protéines chez *Mimivirus* et *Megavirus* sous la forme de plusieurs enzymes nécessaires au chargement des acides aminés sur leurs ARN de transfert respectifs. La mise au jour de ces vestiges remet en question la frontière entre le monde des virus de celui des organismes cellulaires parasites.

## L'usine à virions, un véritable microbe

L'analyse du cycle infectieux de *Mimivirus* et de *Megavirus* nous a ainsi fait comprendre que l'objet biologique auquel se rapporte la complexité du génome de ces virus géants n'est pas le virion (la particule virale), mais l'usine à virions, véritable micro-organisme parasite transitoire, qui n'utilise de la cellule hôte que l'appareil de traduction et les nutriments présents dans son cytoplasme. Dans ce nouveau cadre conceptuel, l'utilisation du mot virus pour désigner à la fois le virion et l'entité biologique globale qui aboutit à sa multiplication apparaît comme une confusion historique, qui doit

être prosaïquement évitée depuis la découverte des virus géants.

Dans le même temps, le débat classique sur l'appartenance des virus au monde vivant est, au moins pour les Mégaviridés, tranché. Pendant leur phase intracellulaire, ces virus ont clairement tous les attributs de la vie microbienne : métabolisme actif, croissance, reproduction. Simplement, ce nouveau type de microbe ne dissémine pas son génome en se divisant comme une bactérie, mais en en produisant de multiples copies.

Parce que la séparation nette du *soma* (l'organisme proprement dit, transitoire et producteur d'agents reproducteurs) du *germen* (les agents de la reproduction, véhicules du génome), le mode de réplication des virus géants apparaît soudain plus proche de celui des organismes dotés d'une reproduction sexuée que de celui des micro-organismes pratiquant la scissiparité. Seul l'avenir nous dira si cette apparente similitude a un sens biologique profond. Mais il est déjà clair que la découverte de *Mimivirus* et de *Megavirus* devrait nous inciter à

l'humilité quand nous nous prenons à penser que toutes les formes de vie ont été reconnues sur notre planète.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Legendre et al., Genomics of megaviruses and the elusive fourth domain of life.

*Communicative & Integrative Biology*, vol. 5(1), pp. 102-106, 2012.

D. Arslan et al., Distant Mimivirus relative with a larger genome highlights the fundamental features of Megaviridae, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 108, pp. 17486-17491, 2011.

J.-M. Claverie et C. Abad, Megavirus décrit l'évolution des virus à ADN, *Biofutur*, vol. 327, p. 11, décembre 2011.

Les virus, ennemis utiles, *Dossier Pour la Science* n° 55, avril-juin 2007.

# 3 FILMS POUR COMPRENDRE NOTRE UNIVERS

3 FILMS POUR COMPRENDRE NOTRE UNIVERS

## ENIGMES DE L'UNIVERS<sup>3</sup>

LE TOUT, LE RIEN ET LE CHAOS

« FASCINANT ET ACCESSIBLE »

\*\*\*TIME OUT\*\*\*

MEILLEUR FILM  
FESTIVAL INTERNATIONAL  
DU FILM SCIENTIFIQUE 2010 - ATHÈNES  
LA VIE SECRÈTE DU CHAOS

SÉLECTION OFFICIELLE  
PARISCIENCE 2011  
CE RIEN QUI EST TOUT

**DÉJÀ DISPONIBLE EN COFFRET 2 DVD**

**FURNACE**

POUR RECEVOIR NOTRE CATALOGUE : SHOWSHANKFILMS@GMAIL.COM

**SHOWSHANK FILMS**

# La diversité des virus aquatiques

Stéphane Jacquet et Caroline Depecker

Abondants et variés – on n'en connaît sans doute qu'une infime partie – les virus aquatiques sont des acteurs clefs des écosystèmes marins et d'eau douce.

Le 31 mai 2012, après 40 jours et 80 000 kilomètres parcourus, l'expédition scientifique *Tara Ocean* s'est achevée à Lorient, en Bretagne. Selon Pascal Hingamp, membre du programme, parmi les quelque 20 000 échantillons prélevés en 153 stations dans les océans du globe et en cours d'analyse, on a déjà identifié, dans les 29 prélèvements de mer Méditerranée, un milliard de paires de bases d'ADN viral, dont 70 millions proviennent de virus géants. La plupart des séquences d'ADN de virus géants détectées n'avaient jamais été répertoriées.

Présents dans les océans à des concentrations avoisinant dix millions par millilitre, les virus sont les entités biologiques les plus nombreuses sur la planète. Mis bout à bout, ils constitueraient un collier de perles dont la longueur dépasserait dix millions d'années lumière. Tous ensemble, les virus marins contiendraient plus d'atomes de carbone que 75 millions de baleines bleues.

C'est seulement à partir de 1989, grâce aux travaux d'une équipe norvégienne, que l'on a pris conscience de l'abondance des virus dans des milieux aquatiques variés. De fortes concentrations ont été mesurées dans les lacs, les rivières, les glaces polaires et les profondeurs océaniques.

SH1 (non classé)

ABV (Ampullaviridé)

ques jusqu'à parfois dans les nuages, ce qui suggère qu'ils jouent un rôle important dans le fonctionnement de la biosphère.

S'intéressant de plus en plus aux virus aquatiques, les chercheurs sont confrontés aujourd'hui à une difficulté de taille : leur diversité. Au regard de cette diversité, les données de référence sont rares, ce qui rend difficiles l'identification et la classification des nouveaux échantillons. Or le nombre d'échantillons analysés a considérablement augmenté ces dernières années, grâce à la multiplication des expéditions océanographiques et des recherches menées sur certains lacs. Malgré la performance des outils de biologie moléculaire, au mieux 30 pour cent des séquences génétiques virales examinées ont été identifiées.

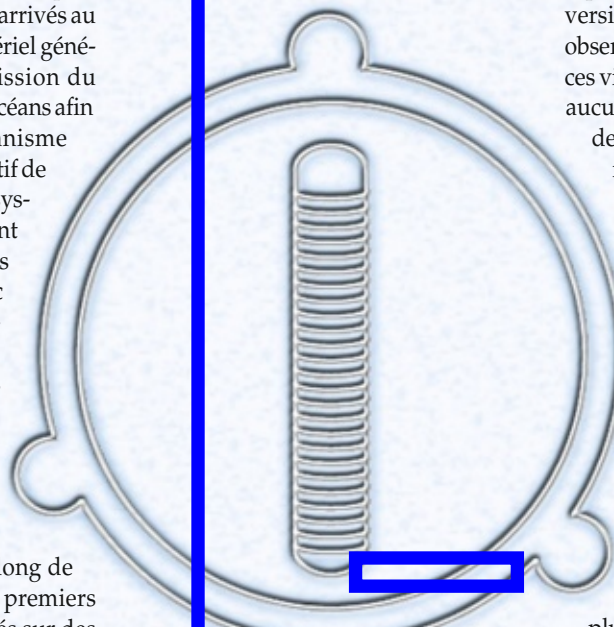
Pour autant, les informations issues de ces analyses, que nous rapportons ici, sont précieuses et bouleversent certains résultats admis jusqu'à présent. Les organismes colonisés par les virus sont ainsi bien plus variés que les espèces bactériennes pressenties. La forme et la taille de certains virus sont également très surprenantes. Enfin, on commence à mesurer l'impact de la diversité virale sur le monde vivant. Grâce à

divers mécanismes, tels la destruction d'une espèce dominante au profit

Phage T4 (Myoviridé)

d'espèces plus rares ou le transfert de gènes viraux vers l'hôte, les virus maintiennent la biodiversité des écosystèmes aquatiques et facilitent le brassage génétique.

Toutes les six à sept semaines pendant près de trois ans, des échantillons en provenance de la goélette *Tara* sont arrivés au Génomus d'Évry, où leur matériel génétique viral est analysé. La mission du voilier consistait à arpenter les océans afin d'y prélever tout type d'organisme marin invisible à l'œil nu. Objectif de l'expédition : étudier divers écosystèmes planctoniques, notamment les interactions des différents micro-organismes les uns avec les autres, ainsi qu'avec leur environnement physico-chimique. Simultanément, les programmes OVID (*Ocean Virus Diversity*), de Matthew Sullivan, et *Tara-Girus*, de Hiroyuki Ogata, ont cartographié la géographie des diversités virales et des métabolismes associés tout au long de l'expédition. Les résultats des premiers séquençages génétiques réalisés sur des échantillons en provenance d'une station de prélèvement suggèrent la présence de nouveaux virus bactériens et de grand nombre et d'un virus géant (ou girus) d'un type inédit.



PSV (Globuloviridé)

## Dans toutes les mers du globe

D'autres programmes scientifiques en cours arrivent aux mêmes conclusions dans diverses régions du globe. Achèvement en 2009, les expéditions océanographiques du programme PAME (*Polar Aquatic Microbial Ecology*) étudient la diversité et la distribution de l'ensemble des micro-organismes habitant les régions polaires : dans ces endroits également, les premiers résultats montrent que les virus sont abondants, diversifiés et sont produits chaque jour en quantité. Le programme GOS (*Global Ocean Sampling*), quant à lui, lancé en 2003 et toujours en cours, a déjà permis d'analyser par séquençage massif des échantillons d'eau de différentes mers et provinces océaniques telles que la mer Noire, la mer Méditerranée, la mer Baltique, la mer du Nord, ainsi que les océans Atlantique, Pacifique, Indien et Arctique.

## L'ESSENTIEL

- ✓ Les virus sont les entités biologiques les plus abondantes et les plus variées des milieux aquatiques.
- ✓ Par des mécanismes de transfert de gènes et de pression de sélection, les virus jouent un rôle clef dans le fonctionnement des écosystèmes et le maintien de leur biodiversité.
- ✓ La diversité des virus et celle de leurs hôtes sont indissociables. Aujourd'hui, la compréhension de leurs interactions constitue un des enjeux de l'écologie aquatique.

Pour la Science

tique. En moyenne, on constate que 200 litres d'eau de mer contiennent plus de 5000 virus différents.

De précédents programmes ont déjà révélé l'étendue de la diversité virale aquatique. En 2005, Mya Breitbart, de l'Université de Californie, et ses collègues ont observé que 30 à 90 pour cent des séquences virales prélevées en zone côtière n'ont aucun homologue connu dans les bases de données génétiques existantes. Ce résultat a été confirmé peu après par une autre équipe californienne, dirigée par Forest Rohwer, qui a proposé pour la première fois une vue d'ensemble de la diversité et de la répartition des virus marins.

À partir de 184 échantillons récoltés pendant dix ans jusqu'à 3000 mètres de profondeur sur 68 sites différents (dans la mer des Sargasses, le golfe du Mexique, les eaux côtières de la Colombie-Britannique et l'océan Arctique), ces scientifiques ont montré que plus de 1 pour cent des séquences virales obtenues étaient inconnues. Parmi elles apparaissent de nombreux cyanophages nouveaux (virus des cyanobactéries, une sous-classe de bactéries photosynthétiques) et des virus à ADN simple brin (virus dont les informations génétiques sont codées sur un seul brin d'ADN et non deux comme dans le génome des mammifères). Ainsi, selon leur estimation, la seule côte de Colombie-Britannique compterait quelque 129 000 génotypes différents (un génotype est l'ensemble des constituants génétiques caractéristiques d'un seul organisme) dans les remontées d'eaux froides. Ces travaux révèlent l'ampleur de notre ignorance : ils suggèrent qu'il existerait plusieurs centaines de milliers de génotypes viraux différents.

Dans une moindre mesure, nos propres analyses, via l'utilisation du séquençage à

**1. QUELQUES VIRUS AQUATIQUES**, représentés d'après leur observation en microscopie électronique. Les phages (page ci-contre en bas) sont les plus répandus. Plus ou moins allongée, leur tête icosaédrique (à 12 faces triangulaires) se prolonge par une queue de longueur variable. Ils s'arriment aux bactéries qu'ils infectent en agissant de leurs « pattes ».

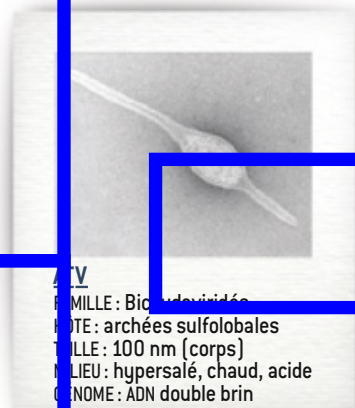
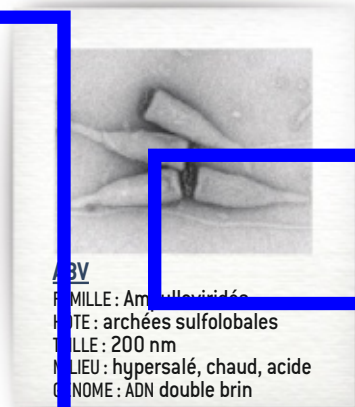
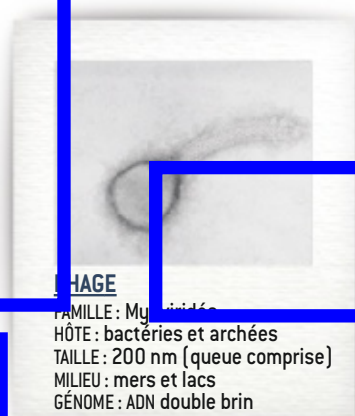
haut débit soulignent aussi une biodiversité élevée en eau douce. Dans le cadre d'une collaboration avec Michael DuBow, de l'Université Paris-Sud à Orsay, nous étudions la diversité des virus « de type T7 », un groupe majoritaire parmi les virus de bactéries à ADN double brin. Nous avons détecté, dans les eaux superficielles du lac d'Annecy plus de 6000 séquences génétiques différentes dans un même échantillon (une date, une profondeur) – soit autant de génotypes ou « espèces » virales potentielles.

## Des virus à ADN à un brin d'ADN ou mixtes

L'énorme quantité d'informations issues de la biologie cellulaire et moléculaire a permis, ces dix dernières années, une remise à plat de nos connaissances sur les virus aquatiques. Tout d'abord, ils arborent des structures moléculaires bien plus variées qu'on ne l'imaginait. On connaissait surtout les virus bactériophages – ou « phages » –, majoritaires à la surface de la planète qui infectent les bactéries et les archées (micro-organismes qui, comme les bactéries, sont unicellulaires et sans noyau, et représentent un des trois règnes du vivant). De fait, aujourd'hui encore, plus de 90 pour cent des virus connus sont regroupés dans l'ordre des *Caudovirales*, c'est-à-dire des phages à ADN double brin. Cette configuration à ADN double brin est aussi celle de nombreux virus du phytoplancton que l'on a rassemblés en une famille, les Phycodnaviridés. Néanmoins, des virus à ARN et, plus récemment, d'autres à ADN simple brin, ont aussi été observés.

Les virus à ARN ont été découverts entre 2000 et 2006. Plusieurs études ont détecté de nombreux virus à ARN différents infectant le plancton, mais seuls quelques-uns ont été isolés et caractérisés, à cause de la lourdeur des techniques nécessaires. Plus récemment, la métagénomique, c'est-à-dire l'analyse du génome global de tous les micro-organismes présents dans un échantillon d'eau de mer, a mis en lumière l'existence de virus appartenant à la superfamille des Picornaviridés, des minuscules virus à ARN longtemps passés inaperçus.

En 2006, une étude publiée par Alexander Culley, de l'Université de Hawaï, a indiqué qu'au moins 100 virus à ARN recueillis dans diverses eaux côtières n'appartenaient



à la longue liste des phages. Cette étude corrobore l'idée selon laquelle la plupart des virus à ARN ont pour hôtes non pas des procaryotes (bactéries ou archées), mais des eucaryotes, c'est-à-dire des organismes cellulaires à noyau bien différenciés tels que les algues, les mollusques, les arthropodes, les poissons et les mammifères. De fait, la diversité virale observée ressemble à celle de virus infectant des plantes ou des animaux terrestres et était déjà connue et répertoriée dans les bases de données génomiques.

La découverte des virus aquatiques à ADN simple brin est encore plus récente. Connue pour infecter les plantes et les animaux – surtout les oiseaux, le porc et les bovins –, cette catégorie virale joue un rôle économique important en détruisant les récoltes ou en infectant le bétail. En analysant par métagénomique la communauté virale de divers écosystèmes marins, des biologistes de l'Université de San Diego ont identifié, il y a six ans, de tels virus en milieu aquatique, qui ressemblaient aux phages de la famille des Microviridés.

Plus récemment, en 2009, d'autres virus à ADN simple brin de la famille des Circoviridés ont été trouvés dans les eaux douces d'un lac en Antarctique : ils dominent la communauté virale au printemps, lors de la fonte des glaces, quand les eucaryotes – leurs hôtes potentiels – sont les plus abondants. À la fin de l'été, ils sont d'ailleurs l'une des deux populations majoritaires, avec les bactéries, ce qui suggère qu'ils jouent un rôle primordial dans l'équilibre des écosystèmes en contrôlant certaines populations eucaryotes.

Enfin, certains virus géants associent, à l'instar des cellules de mammifères, de l'ADN et de l'ARN. C'est le cas de *Marseillevirus*, isolé il y a trois ans dans une amibe d'eau douce. Le génome de ce virus ressemble à une mosaïque de gènes issus des trois règnes du vivant – bactéries, eucaryotes et archées.

Comme ses cousins girus (*Mimi*-, *Mama*-, *Mega*-, *LausanneVirus*, *CroV*), *Marseillevirus* se distingue aussi par sa taille, bien supérieure à la « normale » : son génome est le sixième plus grand génome viral séquencé (368 000 paires de bases) et son diamètre est d'environ 250 nanomètres. Aujourd'hui le record est détenu par *Megavirus chilensis*, isolé des eaux côtières du Chili en 2010 : son génome compte près de 1260 millions de paires de bases et le diamètre de sa capsid est d'environ 400 nanomètres.

est de 440 nanomètres sans sa couronne de fibrilles (une bactérie compte entre 100 000 et plusieurs millions de paires de bases et mesure en général quelques micromètres, soit quelques milliers de nanomètres).

La plupart des virus aquatiques mesurent entre 30 et 60 nanomètres, bien que ceux présents en eau douce aient une taille moyennement légèrement supérieure (entre 50 et 90 nanomètres). Des exceptions existent dans les marigots du Danube, par exemple, où près de 84 pour cent des virus ont des capsides de diamètre supérieur à 60 nanomètres. *Al contrario*, dans le lac Supérieur, aux États-Unis, plus de 50 pour cent des pathogènes viraux ont des têtes (la partie qui contient le matériel génétique) dont le diamètre est inférieur à 30 nanomètres.

## Des virus géants en abondance

Toutefois, depuis une vingtaine d'années, des virus géants, dont les dimensions ont fait exploser les critères de taille, ont été retrouvés un peu partout en eau douce : dans certains réservoirs eutrophes (surabondants en matières nutritives), dans des lacs de l'Arctique ou dans ceux des Alpes. En milieu marin, le virus de *Cafeteria roenbergensis* (CroV), parasite de l'espèce microzooplanctonique éponyme, a été découvert il y a deux ans. Avec 730 000 paires de bases codant 500 protéines, dont celles nécessaires à la réplication du virus, son génome

est le plus grand jamais décrit chez les virus marins, après *Megavirus*. Le fait qu'il parasite une espèce d'un groupe important du plancton unicellulaire, les straménopiles, suggère que ce virus et ses cousins sont très répandus dans les océans.

Les virus géants présentent d'autres particularités. D'une part, contrairement aux virus « classiques », certains, tel *Minivirus*, ne détournent pas la machinerie cellulaire de l'hôte pour que celui-ci synthétise les protéines nécessaires à leur multiplication. Leur génome contient des gènes qui leur permettent d'assurer cette fonction (voir l'article de J.-M. Claverie et C. Aberger page 30). D'autre part, ce type de virus peut lui-même être infecté par un autre virus. Depuis trois ans en effet, une nouvelle espèce virale a été identifiée : le virus de virus. Le premier de ce genre, *Sputnik*, a été trouvé dans *Mamavirus*, dont il empêche le développement normal, mais dont le matériel génétique lui est nécessaire pour proliférer. De même qu'un bactériophage infecte une bactérie, ce pathogène et *Mamavirus*, un virus du virus *CroV* découvert en 2011, sont les premiers membres d'une catégorie virale inédite : les virophages.

La présence de séquences génétiques associées au virus *Sputnik* dans des échantillons d'eau de mer, mise en évidence par l'équipe marseillaise de Didier Raoult, suggère que cette interaction virale originale n'est pas un cas isolé. Les biologistes se penchent à présent sur l'interaction du

## LES AUTEURS

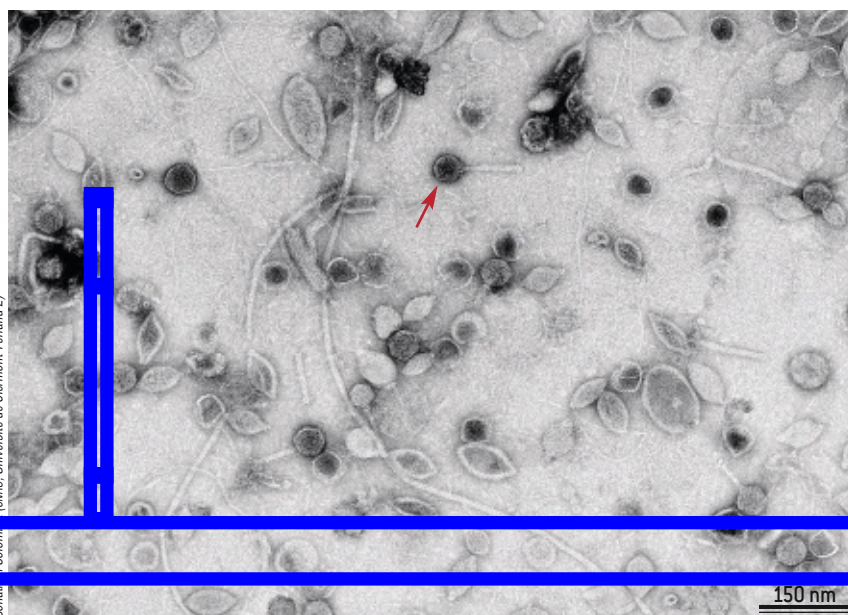


Stéphane JACQUET est directeur de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Il travaille en écologie microbienne aquatique à Thonon-les-Bains.

Caroline DEPECKER est journaliste scientifique.

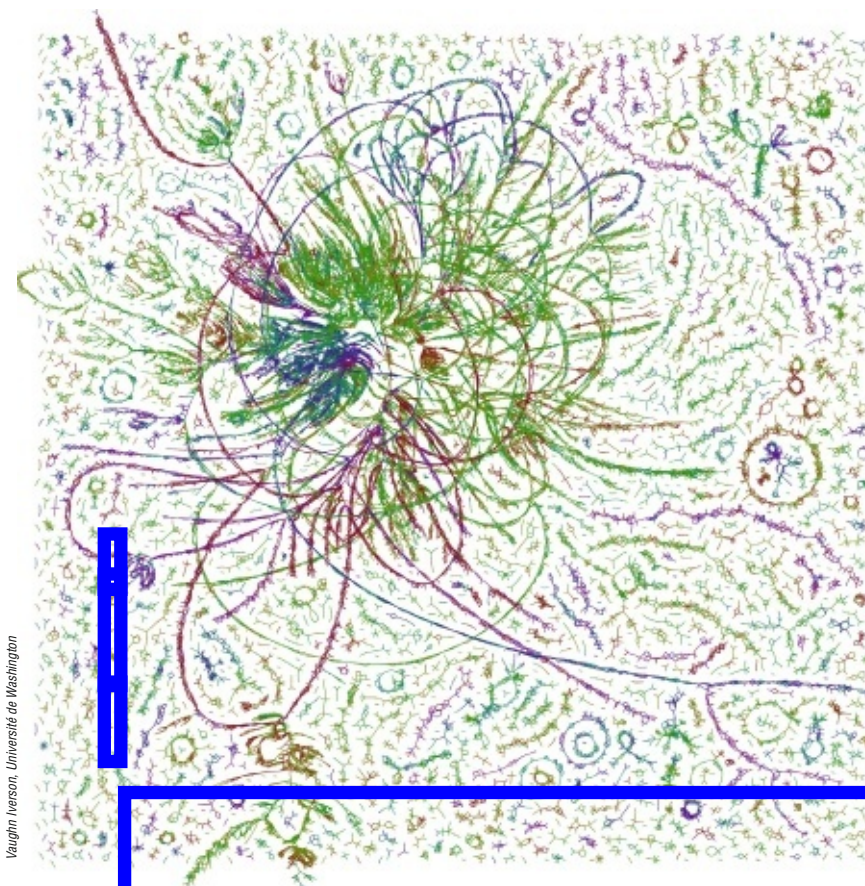


Stéphane Jacquet (INRA, Thonon)



Jonas Colson (CNRS, Université de Clermont-Ferrand 2)

2. LE LAC ROSE, AU SÉNÉGAL (à gauche) et un échantillon viral du lac observé au microscope électronique à transmission (à droite). Les phages sont présents (rouge), mais peu nombreux, mêlés à de nombreuses autres formes virales.



Vaughn Iverson, Université de Washington

**3. REPRÉSENTATION IMAGEE DU MÉTAGÈNOME D'UN ÉCHANTILLON MARIN.** Chaque chaîne représente une séquence d'ADN. Les grandes formes concentriques représentent des séquences de procaryotes, et les petites circulaire, des séquences de virus ou de plasmides (des molécules d'ADN autres que l'ADN chromosomique, chez les bactéries).

plancton marin, des virus géants et de leur propres virus parasites.

Enfin, les virus se distinguent aussi par la diversité de leurs formes. Leur étude par microscopie électronique a montré, dans les systèmes aquatiques, la prédominance des phages à ADN double brin, constitués d'une tête icosaédrique et d'une queue de longueur variée (voir la figure 1). Néanmoins, dans les milieux hypersalés ou les sources géothermales, les virus d'archées prennent des formes inhabituelles. Bouteilles, ampoules, gouttes, épines, billes, filaments, à une ou deux queues... La quarantaine de virus isolés et décrits à ce jour – tous des virus à ADN double brin – ont été regroupés en quelques familles selon leur forme. Dans les eaux du lac Rose, au Sénégal, par exemple, un lac saturé en sel qui doit sa couleur à des bactéries photosynthétiques, nous avons dénombré plus de 100 millions de bactéries et d'archées par millilitre, et noté une teneur en virus dix fois supérieure à la valeur habituelle. Parmi ces virus, des chercheurs français (Institut Pasteur, Uni-

versité de Clermont-Ferrand, IRD) et américains ont observé que moins de un pour cent disposent d'une tête et d'une queue, et de nouvelles formes ont été observées : fragments branchus, chaînettes, maïs, cannes etc. (voir la figure 2).

On a constaté que les séquences génétiques virales analysées dans ce lac sont très proches de celles isolées dans des milieux hypersalés similaires, mais localisés sur d'autres continents. Pourquoi les virus de régions si éloignées présentent-ils de telles ressemblances génétiques ? Une diffusion des gènes sur de si longues distances est peu probable. Selon l'hypothèse la plus plausible, dans ce type de milieu, les virus se seraient adaptés de la même façon pour survivre.

De façon générale, la diversité des virus aquatiques suscite de nombreuses questions sur l'histoire évolutive des virus et celle de leurs hôtes. Quand et comment les virus sont-ils apparus ? La spécificité des virus pour leurs hôtes s'est-elle forgée avant ou après la séparation, sur l'arbre de l'évolution, des règnes du vivant ? On

a en effet constaté que généralement, chaque type de virus a un hôte privilégié et, inversement, que chaque procaryote est la cible d'un virus particulier. Notamment, ils n'infectent pas des organismes des autres règnes du vivant. L'étude phylogénétique des virus aquatiques, de leur diversité et de ses liens avec la diversité du vivant apporte des pistes de réponses.

## Virus et hôtes coévoluent

Tout d'abord, des similitudes (des protéines de la capside identiques, par exemple) ont été observées chez les virus infectant les trois règnes du vivant, ce qui suggère que les virus existaient avant la divergence de ces règnes. Au cours de l'émergence de ces trois domaines du vivant, des virus auraient été sélectionnés et auraient ensuite coévolué avec leurs hôtes. Trois populations virales auraient ainsi connu en parallèle des histoires différentes, associées à celles des trois domaines du vivant.

Plusieurs mécanismes permettent cette coévolution des virus et de leurs hôtes et, de façon plus générale, lient étroitement l'émergence et la diversité du vivant. Nous citons les deux principaux : la pression de sélection qu'exercent les virus sur les populations de procaryotes (bactéries et archées), et le transfert de gènes.

Un milieu donné comporte divers procaryotes dont le nombre fluctue en fonction de la pression de sélection exercée par les virus et ce de diverses façons. En « tuant le meilleur », c'est-à-dire en parasitant l'espèce la plus compétitive (qui est souvent la plus abondante) dans un écosystème donné, les virus laissent vacante une niche écologique où les espèces plus rares – moins compétitives pour les ressources nutritives, notamment – peuvent alors se développer. Celles-ci profitent encore des éléments nutritifs relargués lors de la destruction cellulaire des espèces dominantes – la lyse virale. Enfin, la lyse libère des enzymes qui perturbent les cellules, détruisant les espèces les plus sensibles. La conjonction de ces effets accroît la diversité cellulaire et, par là même, celle des fonctions codées dans les génomes du milieu.

À Tignes-les-Bains, nous avons illustré ces différents processus lors d'expériences consistant à augmenter ou réduire le nombre de virus bactériophages ou cyanophages au sein d'échantillons d'eau douce mis en bouteille et issus de sources pélagiques.

Ces variations ont eu un impact mesurable sur le nombre de populations de micro-organismes, planctoniques notamment. Elles ont aussi modifié la quantité de matière organique libérée sous forme de carbone ou de phosphore, ou encore la structure de la communauté bactérienne et la proportion de bactéries dites lysogéniques. Ces bactéries portent un virus « dormant », c'est-à-dire qui ne se réplique pas, mais qui peut se « réveiller » à tout moment en fonction de son environnement.

Un autre mécanisme important par lequel la biodiversité virale influence le vivant est le transfert de gènes entre espèces. Un virus dormant dans un procaryote ou un eucaryote peut intégrer son matériel génétique dans celui de son hôte. Cette intégration confère au receveur de nouvelles propriétés, en général une plus grande résistance et une protection contre l'infection par d'autres virus, mais aussi des propriétés métaboliques, morphologiques, immunogénétiques, voire pathogènes inédites. C'est ainsi que la bactérie responsable de la tétanie, *Clostridium botulinum*, a acquis sa toxicité grâce à un gène d'origine virale, tout comme *Corynebacterium diphtheriae* (diphthérie) et *Clostridium botulinum* (botulisme). De même, la syncytine, une protéine d'origine virale, semble indispensable à la formation du placenta des mammifères. Le transfert de gène a ici eu un effet positif.

acquis sa toxicité grâce à un gène d'origine virale, tout comme *Corynebacterium diphtheriae* (diphthérie) et *Clostridium botulinum* (botulisme). De même, la syncytine, une protéine d'origine virale, semble indispensable à la formation du placenta des mammifères. Le transfert de gène a ici eu un effet positif.

## Des gènes transférés du virus à l'hôte

En milieu aquatique, le transfert de gènes entre les cyanobactéries et leurs virus, les cyanophages, est particulièrement intéressant. Au fil de leur évolution, les cyanophages ont assimilé dans leur génome de nombreux gènes – probablement récupérés chez leurs hôtes – qui codent des composants clés de l'appareil photosynthétique bactérien. Exprimés pendant l'infection, ces gènes assurent que la photosynthèse et d'autres fonctions de la cyanobactérie perdurent pendant la répllication des virus, alors que les protéines bactériennes dont c'était

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Jacquet *et al.*, Viruses in aquatic ecosystems: Important advancements of the last 20 years and prospects for the future in microbial oceanography and limnology, *Advances in Oceanography and Limnology*, vol. 1, pp. 21-101, 2010.

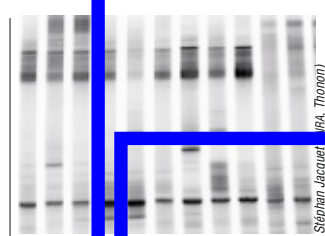
A. Bize *et al.*, Les archéovirus, *Virologie*, vol. 14, n° 2, pp. 101-117, 2010.

M. G. Fischer *et al.*, Giant virus with a remarkable complement of genes infects marine zooplankton, *PNAS*, vol. 107, pp. 19508-19512, 2010.

Les virus, ennemis utiles, *Dossier Pour la Science*, n° 55, avril 2007.

F. E. Angly *et al.*, The marine viromes of four oceanic regions, *PLoS Biology*, vol. 4, n° 11, e368, doi:10.1371/journal.pbio.004036, 2006.

Un gel DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) montrant des bandes sombres correspondant à des populations virales cyanophages (bandes sombres) du lac du Bourget sur 12 mois (colonnes).



Un gel DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) montrant des bandes sombres correspondant à des populations virales cyanophages (bandes sombres) du lac du Bourget sur 12 mois (colonnes).

l'absence de résultats quantitatifs : les méthodes utilisées pour amplifier l'ADN viral extrait du prélèvement (notamment l'amplification aléatoire de génomes entiers) engendrent des biais quantitatifs importants, ce qui limite l'analyse des abondances relatives des différents virus. En outre, il est impossible d'étudier les virus à ADN et ceux à ARN, ce qui ne facilite pas leur étude comparative.

Aujourd'hui, aucun consensus n'existe quant à la méthode à utiliser pour étudier la diversité virale. Leur choix dépend des moyens disponibles et de ce que l'on recherche.

## LES OUTILS D'ANALYSE DE LA DIVERSITÉ VIRALE

La diversité génétique est difficile à évaluer pour deux raisons. D'une part, les virus se cultivent mal en laboratoire et, d'autre part, ils n'ont pas de gène universel conservé, ce qui ne facilite pas leur classification. Présent chez tous les procaryotes, le gène codant l'ARN ribosomique 16S a par exemple été très utile pour établir les liens de parenté entre les bactéries. Pour les bactériennes, par l'examen des variations, d'une souche à l'autre, de la séquence du gène.

Les méthodes classiques dites d'empreinte génétiques comme la PFGE (électrophorèse sur gel en champ pulsé) ou la PCR-DGGE (réaction de polymérisation en chaîne - électrophorèse sur gel en gradient dénaturant) permettent d'analyser la structure de populations ou de communautés à partir de morceaux de génome ou du génome entier. Elles révèlent la diversité virale, mais présentent des limites : les populations sont souvent concentrées et donc dominantes dans le milieu pour que leur empreinte apparaisse sur le gel (sous

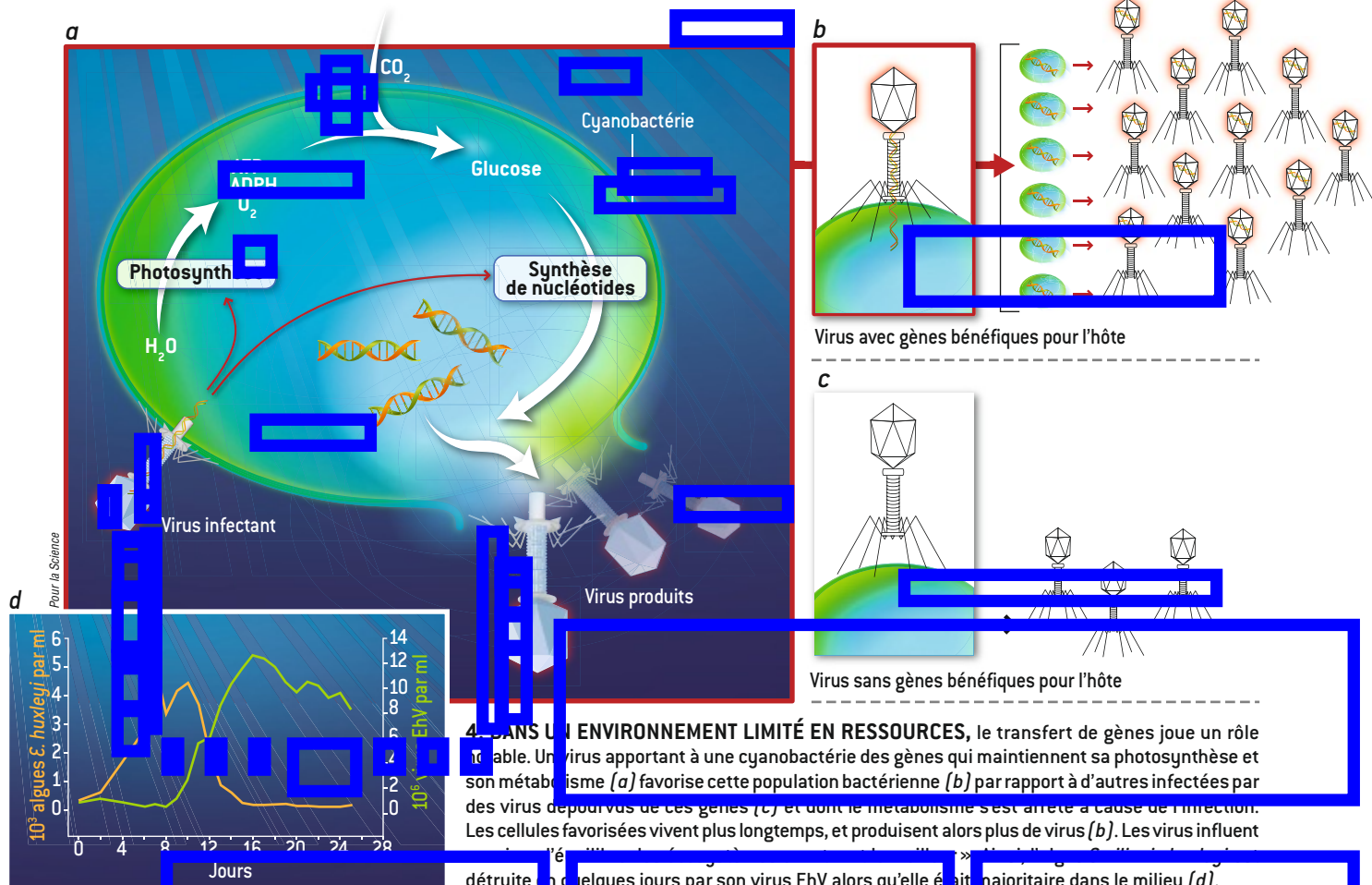
la forme de bandes sombres). Par exemple, à partir d'un échantillon de 20 litres d'eau, on n'observe pas plus de 10 à 30 empreintes de populations par la technique de la PFGE (une population correspond à une bande sur gel), chacune équivalant à 10<sup>6</sup> à 5 pour cent de la communauté détectée. En outre, la PFGE ne distingue pas les génotypes de virus à ADN double brin (les virus à ARN traversent ses grilles d'analyse).

La métagénomique est une approche récente, puissante, qui permet d'analyser les génomes de tous les micro-organismes (virus, archées, bactéries, eucaryotes) présents dans un même échantillon sans qu'il soit nécessaire de les séparer ni de les cultiver en laboratoire. On prélève plusieurs dizaines de litres d'eau dans l'environnement, que l'on filtre pour ne garder que les entités virales (de moins de 200 nanomètres). L'échantillon est ensuite concentré, puis l'ADN ou l'ARN total en est extrait,

purifié et séquencé par des méthodes à haut débit.

Après reconstitution des séquences obtenues, l'analyse informatique fournit des informations sur la diversité virale et aide à identifier des fonctions importantes. Comment repère-t-on les génomes viraux parmi toute l'information génétique de l'échantillon ? À l'aide d'indices de similarité dans les séquences et des similarités de séquences. Ces éléments suffisent à identifier et à classer la famille du virus si celle-ci est présente dans les bases de données existantes.

Au moins 50 métagénomes viraux d'eau de mer ont été séquencés et on a ainsi révélé, par séquençage massif, l'étendue de la diversité virale. Pour autant, la métagénomique est une méthode lourde à utiliser, notamment pour déterminer comment varie cette diversité dans l'espace et dans le temps, et pour un grand nombre d'échantillons. Un écueil majeur des analyses métagénomiques virales est



détruite en quelques jours par son virus EhV alors qu'elle était majoritaire dans le milieu (d).

inopérantes. Le maintien de l'activité photosynthétique profite au phage : il peut continuer à utiliser la machinerie cellulaire de son hôte pour se répliquer jusqu'au dernier moment – lorsque la bactérie, gorgée de virus, explose.

Bien qu'aléatoire (il dépend de la rencontre d'un virus et de son hôte), ce processus est très répandu chez les procaryotes. En 1998, Sunny Jiang et John Paul, de l'Université de Californie à Irvine, aux États-Unis, évaluaient à 10<sup>14</sup> le nombre de transductions virales (transferts de gène) ayant lieu chaque année dans la seule baie de Tampa, le long du golfe du Mexique sur la côte Ouest de la Floride. Et en 2009, F. Rohwer et Rebecca Vega-Thurber, de l'Université d'État de San Diego, en Californie, avançaient le nombre de 10<sup>24</sup> pour l'ensemble des océans, selon une évaluation prenant en compte les concentrations bactériennes et virales connues, la probabilité de rencontre de l'hôte et du virus ou encore les conditions environnementales.

Ce mécanisme de transfert génétique n'est pas l'apanage des procaryotes. Il existe aussi, dans une moindre mesure, chez les eucaryotes. Les virophages semblent d'ail-

leurs aussi participer au transfert de matériel génétique chez ces organismes : *Mavivirus*, le virus du virus *CroV* découvert en 2011, pourrait être à l'origine des transposons, ces fragments d'ADN capables de se déplacer et de se multiplier de façon autonome dans un génome eucaryote.

## Des abysses encore inexplorés

Aujourd'hui, il n'est plus possible d'ignorer le rôle des virus dans les écosystèmes aquatiques. Par leurs activités régulatrices des populations, ou grâce à l'action indirecte de leurs gènes, les virus aquatiques, de par leur nombre et leur diversité, contribuent de façon essentielle à la biodiversité en augmentant la variabilité génétique des micro-organismes. Ce faisant, ils participent à la régulation du fonctionnement écologique de la planète et à ses changements évolutifs. Ils pourraient même prendre part à la régulation climatique : en recyclant la matière organique présente dans les océans, ils modifient le flux de carbone qui y transite, notamment son transfert vers le fond, et influent *in fine* sur la quantité de gaz

carbonique que ces derniers absorbent ou rejettent dans l'atmosphère.

La compréhension de leur impact réel sur l'environnement et de leur rôle dans l'évolution du vivant n'en est qu'à ses débuts. C'est la même que l'étude de leur diversité. Le volume des océans est tel que seule une infime proportion a été explorée à ce jour. Au-delà de 200 mètres de profondeur, les sous-marins scientifiques n'ont visité que l'équivalent de la région parisienne. Qu'y a-t-il dans les milliards de mètres cubes restant à explorer ? Près des sources froides d'où s'échappe le méthane, où des écosystèmes se constituent, ou dans les fumeurs chauds et noirs, des cheminées hydrothermales riches en sulfure d'hydrogène ? Ou encore près des coraux profonds que l'on commence à découvrir et des monts sous-marins inexplorés ?

À l'automne 2010, un vaste programme de recensement de la vie marine, le *Census of Marine Life*, s'est achevé en concluant à l'existence de 250 000 espèces « visibles » dans les océans, dont près de 5 000 nouvelles. Ce programme estimait qu'il restait 1,5 million d'espèces à découvrir. Et certainement au moins autant de virus.

# TOUS LES MOIS, PRENEZ UN GRAND BOL D'AIR SCIENTIFIQUE AVEC

## POUR LA SCIENCE



Abonnez-vous !

19 €/trimestre  
seulement !

- ✓ **Pratique** avec un paiement tous les 3 mois
- ✓ **Économique** par rapport au prix en kiosque
- ✓ **Modulable** : vous choisissez votre durée !



## BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

POUR LA SCIENCE

1 ☐ Oui, j'ai l'abonnement à **Pour la Science** (12 n°s / an) + **Dossier Pour la Science** (4 n°s / an) au prix de **19€ par trimestre** ou **76€ pour un an**. Je reçois 16 numéros par an et bénéficie aussi des versions numériques sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

2 J'indique mes coordonnées :

Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_  
Adresse : \_\_\_\_\_  
Code postal : \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_ Pays : \_\_\_\_\_ Tél. (facultatif) : \_\_\_\_\_  
E-mail : \_\_\_\_\_

3 Je choisis mon mode de règlement

☐ Je règle en **douceur 19€/trimestre**. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement un RIB.

\*\* Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

**Autorisation** : Pour la Science vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de comptes habituels. Je m'adresse directement à Pour la Science pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte : \_\_\_\_\_  
Nom, Prénom : \_\_\_\_\_  
N° : \_\_\_\_\_  
Code postal : \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_  
Établissement : \_\_\_\_\_ à débiter  
Établissement : \_\_\_\_\_  
Rue : \_\_\_\_\_  
Code postal : \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_

Compte à débiter : \_\_\_\_\_  
Établissement : \_\_\_\_\_ Code guichet : \_\_\_\_\_ N° de compte : \_\_\_\_\_ Clé RIB : \_\_\_\_\_  
Signature (obligatoire) : \_\_\_\_\_

☐ Je préfère régler mon abonnement comptant en deux versements :

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ par carte bancaire

N° : \_\_\_\_\_  
Expire fin : \_\_\_\_\_ Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : \_\_\_\_\_

Signature obligatoire : \_\_\_\_\_

En application de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Si vous ne souhaitez pas que vos données soient communiquées à notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐

Organisme créancier  
Pour la Science  
SIRET : 750007500  
N° national d'identification : 750007500

PLS415 - Offre réservée aux abonnés à Pour la Science - Valable jusqu'au 31.05.2012

# L'ANTARCTIQUE, terre promise des PALÉONTOLOGUES

Sebastien Steyer et Diego Gerez

**Les fossiles de l'Antarctique témoignent d'étapes clés de la vie. Le grand continent blanc a en effet plusieurs fois servi de refuge ou de pont entre l'Océanie et les Amériques voire l'Afrique.**

## L'ESSENTIEL

- ✓ L'Antarctique a fait partie de l'ancien supercontinent du Gondwana, ce qui lui confère un grand intérêt paléontologique.
- ✓ Seules les montagnes qui traversent le continent rendent possible l'accès aux formations géologiques.
- ✓ Les paléontologues y ont déjà découvert de nombreux fossiles de plantes et d'animaux, dont certains aident à comprendre l'histoire de la vie.
- ✓ L'exploration paléontologique du grand continent blanc, malgré le climat extrême, est riche de promesses.

es découvertes paléontologiques se suivent et ne se ressemblent pas en Antarctique. Dinosaures, stégocéphales (des amphibiens primitifs), mammifères anciens, insectes, microfossiles de bactéries, plantes... le continent glacé a manifestement accueilli dans le passé de nombreuses formes de vie, ce qui, malgré les difficultés du travail de terrain, pousse de plus en plus de paléontologues à partir pour l'extrême Sud. L'histoire géologique de la Terre et celle de la vie sont telles qu'à plusieurs reprises, l'Antarctique joua un rôle clé dans l'évolution de la vie. Nous l'illustrerons en présentant les plus notables des fossiles déjà découverts sur le continent blanc.

L'Arctique polaire est une mer recouverte de glace, tandis que les 14 millions

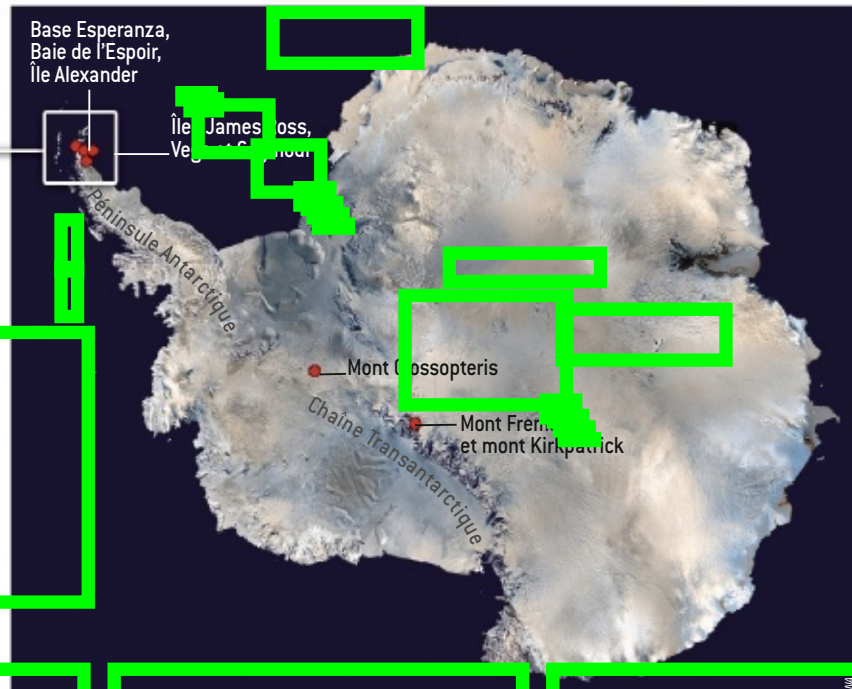
de kilomètres carrés de l'Antarctique sont isolés par les eaux océaniques. Quelque 3 600 kilomètres séparent ainsi l'Antarctique de l'Afrique du Sud, 2 000 de la Tasmanie ou de la Nouvelle-Zélande, et 1 000 de l'Amérique du Sud. Toutes situées à plus de 60 degrés de latitude Sud, les terres antarctiques sont les plus froides de la planète : la température la plus basse jamais relevée sur Terre l'a été à la station antarctique russe de Vostok : -89,2°C.

L'altitude moyenne de l'Antarctique, 2 300 mètres, en fait aussi le continent le plus élevé du monde. Toutefois, cette

**1. DES ROCHES FOSSILES ENES :** c'est ce que se demande ce paléontologue, heureux d'être parvenu au pied de l'une des rares formations géologiques accessibles en Antarctique.



© Gavin Powell/Corbis



## 2. LES PRINCIPAUX SITES À FOSSILES

de l'Antarctique se concentrent pour l'instant dans les zones montagneuses que sont la chaîne Transantarctique, la péninsule Antarctique et les îles proches. Ces montagnes sont pratiquement les seuls endroits où affleurent de grandes formations géologiques susceptibles de contenir des fossiles.

valeur résulte avant tout des épaisseurs de glace : elles atteignent quatre kilomètres. Ces calottes empêchent d'accéder directement au sous-sol antarctique, dont la forme se révèle grâce à la mesure de l'épaisseur de la glace conjuguée à l'imagerie radar par satellite. Le socle rocheux sous-jacent se trouverait en fait à deux kilomètres sous le niveau de la mer en moyenne !

Deux grandes calottes glaciaires, – la calotte orientale et la calotte occidentale – recouvrent l'Antarctique. Le relief sous-glaciaire (et potentiellement sous-marin) de la calotte orientale a la forme de sous-massifs montagneux marqués de vallées, où s'écoulent de nombreuses rivières souterraines, qui participent à la progression des glaces vers les océans périphériques. Et récemment, 14 lacs sous-glaciaires ont été détectés à distance et cartographiés.

Les paléontologues espèrent que ce paysage enfoui a gardé des traces de l'évolution des faunes et des flores qui ont habité le Gondwana. Cet ancien supercontinent de l'hémisphère Sud s'est assemblé il y a 550 à 500 millions d'années et regroupait les terres qui allaient devenir les actuelles Afrique, Amérique du Sud, Australie, Inde, Madagascar, Nouvelle-Guinée, péninsule Arabique, Tasmanie, et... l'Antarctique. Le Gondwana a subi un impact durant l'évolution des premiers verté-

brés à quatre pattes (des tétrapodes) – c'est-à-dire du Dévonien moyen (il y a 370 millions d'années) à la fin du Permien (251 millions d'années) – ainsi que pendant l'apparition des dinosaures et autres reptiles, jusqu'au Trias supérieur (200 millions d'années environ). Vers le début du Jurassique, il y a quelque 180 millions d'années, un réseau de rifts s'est développé en plusieurs plaques qui ont commencé à s'écarter (voir la figure 3).

Toutefois, le trio de plaques constitué par l'Australie, l'Antarctique et l'Amérique du Sud est resté connecté ou presque jusqu'à la fin du Crétacé, voire au-delà. Il a ainsi joué un rôle clef dans l'évolution des espèces : celui d'un pont intercontinental emprunté par les grandes migrations. Les paléontologues se posent à ce propos de nombreuses questions, auxquelles, espérons-le, les fossiles apporteront des éléments de réponse.

## Premiers tétrapodes terrestres ?

L'Antarctique est restée 170 millions d'années soudée à d'autres continents, à l'époque où apparaissaient les amphibiens anciens (ancêtres de tous les vertébrés terrestres) et les reptiles antérieurs aux dinosaures. Cette longue durée est liée au fait que l'une de ses deux grandes provinces géologiques, l'Antarctique orientale, est un vaste craton, c'est-à-dire un élément de

croûte continentale dont toutes les unités géologiques partagent la même histoire depuis plusieurs cycles tectoniques. De fait, ses roches remontent toutes au moins au Précambrien (il y a plus de 542 millions d'années) : il s'agit de gneiss et de granites, dont certains datent de trois milliards d'années. De ce craton fortement érodé, il ne reste aujourd'hui que les zones plissées les plus profondes, qui forment le socle de nombreuses chaînes de montagnes.

Or, à la fin du Permien, il y a quelque 250 millions d'années, 70 pour cent des espèces terrestres et 95 pour cent des espèces marines ont disparu. La région antarctique a-t-elle pu jouer le rôle de refuge pour des amphibiens et des reptiles anté-dinosauriens qui auraient survécu à cette grande crise biotique ? Y retrouvera-t-on un jour le squelette de l'un des premiers tétrapodes terrestres ? Ce serait passionnant, mais pour le moment, on voit mal

comment pour accéder à d'éventuels sites à fossiles, il faudrait franchir plusieurs kilomètres de glace...

C'est pourquoi les espoirs de trouver des fossiles clefs se portent surtout sur la seconde grande province géologique du continent blanc : l'Antarctique occidentale. Même si cette zone est recouverte par la calotte occidentale, les anciens fonds océaniques qui la constituent en partie ont été comprimés par la tectonique. Ces strates plissées sont accompagnées

de roches éruptives jurassiques forment deux grandes chaînes de montagnes : la péninsule Antarctique et la chaîne Transantarctique. La première serait le prolongement de la cordillère des Andes avant que le Gondwana ne se disloque définitivement, il y a 50 millions d'années. La seconde résulterait de la collision entre l'Antarctique occidentale et l'Antarctique oriental, collision en cours depuis la fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années. Elle est aussi composée de grès, d'argiles, de silt et de charbons, etc., bref de sédiments plissés et déposés entre le Dévonien (voire le Silurien) et le Jurassique, soit sur plus de 200 millions d'années. Ces deux chaînes de montagnes ont l'avantage d'être en partie accessibles, car elles émergent de la mer et de la glace.

Pour l'heure, les explorations paléontologiques se sont davantage portées sur la péninsule Antarctique, plus accessible. Près de la baie de l'Espoir (*Hope Bay*), non loin de la base argentine d'Esperanza, les schistes noirs du mont Flora ont livré de nombreux fossiles de plantes du Jurassique. Ces vestiges permettent d'établir des liens avec les gisements comparables de l'hémisphère Nord et renseignent aussi sur les paléoclimats antarctiques. Le continent n'a en effet pas toujours été aussi froid : la tectonique lui a fait subir beaucoup de déplacements dans l'hémisphère Sud et il y a plus de 440 millions d'années, il s'est même trouvé proche de l'équateur !

Pendant une partie importante de son histoire, l'Antarctique a donc été couverte

de forêts luxuriantes sous des climats chauds ou tempérés. De fait, la flore du mont Flora comprend des espèces – dont certaines nouvelles – de bryophytes (mousses), de spénophytes (prêles), de fougères, de cycadales, de ptéridospermées (fougères à graines) et de conifères. Seul site à paléoflore du continent à avoir fait l'objet d'études approfondies, le mont Flora est devenu une référence pour le Jurassique, notamment en raison des conditions exceptionnelles qui y ont rendu possible la fossilisation de bois. Toutefois, l'Antarctique nous en dira sans doute beaucoup plus sur l'évolution des plantes : Jane Francis, de l'Université de Leeds en Grande-Bretagne, reconstitue par exemple la composition des forêts crétacées de l'île Alexandre et en tire aussi des informations climatiques.

## Des dinosaures à Santa Marta

C'est aussi à l'extrémité de la péninsule Antarctique qu'ont été découverts la plupart des sites à dinosaures de l'Antarctique. Ainsi, la formation de Santa Marta, sur l'île James Ross, prospectée notamment par le Service britannique de recherche en Antarctique (*British Antarctic Survey*), a fourni depuis les années 1970 de nouveaux poissons cartilagineux (requins) et osseux (actinoptérygiens), mais aussi d'abondants restes de reptiles marins de type mosasaure (*Taniwhasaurus antarcticus*). Ce dernier se révèle

## LES AUTEURS



Sébastien STEYER, paléontologue, est chargé de recherche au CNRS et travaille au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Diego GEREZ est archéologue indépendant, spécialisé dans l'observation de la Terre depuis l'espace.

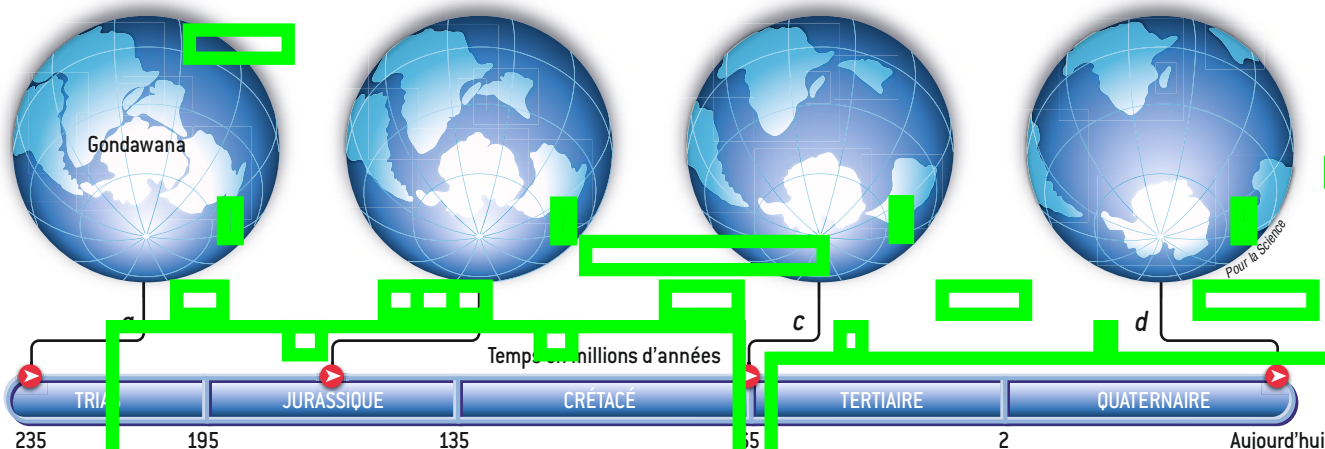
## ✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Vickers-Rich et T. Rich, Les dinosaures polaires, Dossier Pour la Science n° 1, « Les dinosaures », pp. 44-49, 1993.

C. Loris et J. Carpentier, Voyage dans l'Anthropocène, Actes Sud, 2011.

J. S. Steyer, La Terre avant les dinosaures, Belin-Pour la Science, 2009.

C. Sidor et al., *Parotosuchus* (Temnospondyli: Mastodontosauridae) from the Triassic of Antarctica, *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 27(1), pp. 232-235, 2007.



**3. FORMÉ IL Y A PLUS DE 500 MILLIONS D'ANNÉES**, le supercontinent Gondwana est ensuite intégré à un supercontinent plus grand encore : la Pangée (a). Au début du Jurassique, la Pangée se fracture, libérant le Gondwana qui commence aussitôt à se disloquer. Il y a 100 millions d'années (b), l'Amérique du Sud, l'Afrique, Madagascar, l'Inde, la Nouvelle-Zélande, l'Australie, l'Antarctique et la Nouvelle-Guinée sont encore très proches au sein du Gondwana. Ensuite, les péninsules Antarctique et Sud-Améri-

caine deviennent plus ou moins connectées, et le resteront jusqu'à la séparation définitive du bloc Inde-Madagascar vers 105 millions d'années. À la fin du Crétacé (c), il y a environ 65 millions d'années, l'Australie et la Nouvelle-Guinée se séparent de l'Antarctique tout en restant proches jusqu'à vers 40 millions d'années, de sorte que des connexions épisodiques s'établissent en fonction du niveau marin. Aujourd'hui, l'Antarctique est totalement isolée de l'Australie et de l'Amérique du Sud (d).



**4 CETTE MOLAIRE SUPÉRIEURE** de marsupial a été trouvée dans la formation géologique de La Meseta sur l'île Seymour (ci-contre) par Francisco Goin, du Musée de La Plata en Argentine, et des collègues. Elle ajoute au registre fossile antarctique une espèce de marsupiaux de la famille des microbiotheriidés.

proche des formes observées en Patagonie et en Nouvelle-Zélande, ce qui suggère la proximité de ces terres à la fin du Crétacé.

Un nouveau genre de dinosaure herbivore massif et caparaçonné y a aussi été découvert en 1986 par les géologues argentins Eduardo Olivero et Roberto Scasso. Une unique espèce le représente: *Antarctopelta oliveroi* (voir la figure 6).

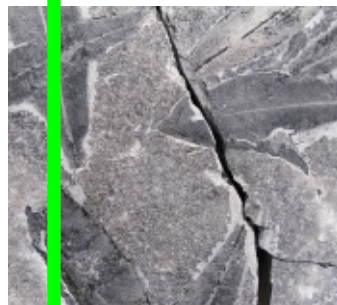
Les gros marins du Crétacé supérieur de l'île Vega sont également connus pour leurs reptiles marins (mosasaures et plésiosaures). Ils ont par ailleurs livré des restes d'oiseaux et d'autres dinosaures carnivores (théropodes). Une dent typique du groupe des hadrosaures, des dinosaures à bec de canard, a été mise au jour en 1998 sur cette île lors d'une expédition argentine-américaine. Cette première pour le continent est d'importance, car elle suggère que la faune a fait l'objet de grandes migrations entre l'Amérique du Sud et l'Antarctique vers la fin du Crétacé, il y a environ 7 millions d'années.

Tout indice sur la diffusion, via l'Antarctique, des faunes de vertébrés terrestres postérieurs à la crise biotique de la fin du Crétacé est aussi d'un grand intérêt. En 1982, une équipe américaine de l'Institut d'études polaires de l'Ohio a découvert pour la première fois des marsupiaux fossiles (du groupe des polydolopides) sur l'île Seymour (voir la figure 4). Datant d'environ 40 millions d'années, ces fossiles prouvent que l'Antarctique a assuré après le Crétacé un passage entre l'Australie et l'Amérique du Sud. Les migrations se sont peut-être effectuées en relation avec les arbres du genre *Nothofagus*, qui poussent de part et d'autre de l'Océanie, c'est-à-dire à la

## Les végétaux fossiles

En Antarctique, on a découvert des fossiles de végétaux surtout dans la péninsule Antarctique. Les premiers ont été mis au jour il y a plus d'un siècle sur le mont Flora qui domine la baie de l'Espoir, non loin de la station argentine Esperanza. Ces fossiles montrent que, malgré la latitude élevée, des forêts tempérées ont existé en Antarctique au Jurassique et au Crétacé. Par ailleurs, des plantes du genre *Glossopteris* (ci-dessous), typique du Permien, ont été mises au jour au centre de la chaîne

Transantarctique, sur une montagne nommée depuis... le mont Glossopteris.



Peter Rajcek, National Science Foundation

fois en Amérique du Sud, en Nouvelle-Guinée, en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Nouvelle-Calédonie. Quoi qu'il en soit, ces migrations expliquent en partie que l'on trouve aujourd'hui des marsupiaux en Amérique (les didelphidés ou opossums) et pas seulement en Océanie.

Outre les mammifères terrestres, des restes d'une baleine de 49 millions d'années ont été découverts en 2011 sur l'île Seymour par une équipe de l'Institut argentin de l'Antarctique et des muséums de La Plata et de Stockholm. Ce cétacé carnivore appartient au groupe des Basilosaurides, dont la présence dans les mers du Sud était déjà connue. On apprend ainsi que l'un de ses représentants séjournait en Antarctique. D'une taille de quatre à six mètres, l'animal est le plus ancien cétacé aquatique connu.

## Chaîne Transantarctique : des fossiles clefs

L'exploration paléontologique de la chaîne Transantarctique semble aussi prometteuse. Ses montagnes comportent en effet des roches fossilifères déposées plus ou moins en continu entre 400 et 180 millions d'années. Surmontant un socle de basalte et de gneiss, ces strates correspondent à des sédiments plutôt continentaux (grès, siltite, horfille). Véritable fenêtre ouverte sur l'évolution, elles affleurent sur les versants de la chaîne et constituent une aubaine pour les paléontologues s'intéressant à l'émergence de la vie sur Terre, puis que certaines couches ont été formées avant et après la grande crise biotique de la fin du Permien.

En paléobotanique, la moisson a été jusqu'ici mince, mais cela ne durera probablement pas. Il suffit de penser au mont Glossopferis, que l'on nomma ainsi en 1958 après que des empreintes de ce genre de fougères géantes du Permien eurent été découvertes sur sa face Nord (voir page précédente).

Dans le cadre du programme de la Fondation américaine pour la science (NSF) pour l'exploration de la chaîne Transantarctique, une équipe créée par William Hammer, de l'*Augustana College* dans l'Illinois, aux États-Unis, tente de trouver dans ces montagnes des fossiles couvrant toute le Mésozoïque (Trias, Jurassique et Crétacé). Depuis peu, elle se concentre sur les strates de la formation triasique de Fremouw (voir la figure 2).

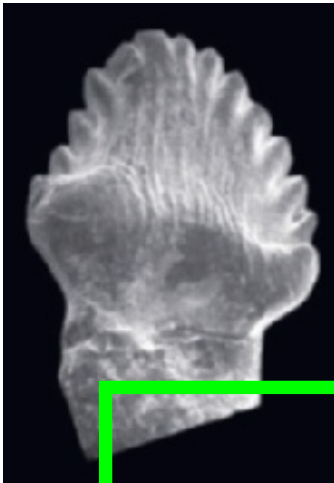
## Amphibiens à écailles sur le pic Fremouw

Les découvertes que cette équipe y a réalisées constituent un témoignage complémentaire sur la reconquête de la Terre par la vie après la grande catastrophe de la fin du Permien. Les chercheurs ont notamment mis au jour des restes de reptiles synapsides (reptiles mammaliens dont sont issus les mammifères) – et de stégocéphales (grands amphibiens archaïques). Ces stégocéphales d'Antarctique, dont l'étude a été en partie effectuée par l'un de nous (S. Steyer), sont représentés par des crânes de plus de 60 centimètres de longueur ainsi que par des restes post-crâniens. Amphibiens géants à écailles, aquatiques et carnivores, ils ressemblaient à des crocodiles et devaient occuper les mêmes niches écologiques qu'eux. Ils appartiennent à un genre cosmopolite nommé *Marotosuchus*. Sa présence en Antarctique indique que cette partie du continent a constitué un refuge après la grande extinction de la fin de Permien.

Quant aux synapsides de la formation de Fremouw, ils appartiennent au groupe des dicynodontes, apparu au milieu du Permien. Ces reptiles mammaliens (souvent fouisseurs, pense-t-on) sont caractérisés par de grosses dents évoquant des canins de chien. Des terriers fossiles ont aussi été retrouvés. Ils sont attribués à de petites espèces de dicynodontes. Ces fossiles semblent reliés aux faunes du bassin du Karoo en Afrique du Sud, ce qui devrait permettre de les dater finement. Certains de ces grandes faunes



**5. CRYOLOPHOSAURUS ELLIOTI ÉTAIT UN DINOSAURE PRÉDATEUR**, mesurant jusqu'à huit mètres et qui portait sur la tête une crête osseuse, probablement utile pendant la parade (ennemi), d'où son nom signifiant « lézard à crête de glace ». La présence en Antarctique d'un prédateur aussi grand prouve qu'au début du Jurassique, il y a environ 185 millions d'années, les climats de cette région étaient riches et productifs, même s'il gelait plusieurs mois par an.



**6. ANTARCTICA SPINOSAURUS EST LE PREMIER DINOSAURE** jamais découvert en Antarctique. Cette espèce herbivore du groupe des ankylosaures vivait sur ce continent au Crétacé, il y a quelque 70 millions d'années. Ses dents munies de denticules (à gauche) lui étaient utiles

pour cisailier les fibres des végétaux, dont il aurait probablement dévoré de grandes quantités, longuement digérées ensuite par une fermentation. Protégé par sa taille et par une carapace de plaques osseuses dermiques, il était doté d'une « masse d'arme » au bout de sa queue.

ont-elles reconquis le monde à partir de l'Antarctique ?

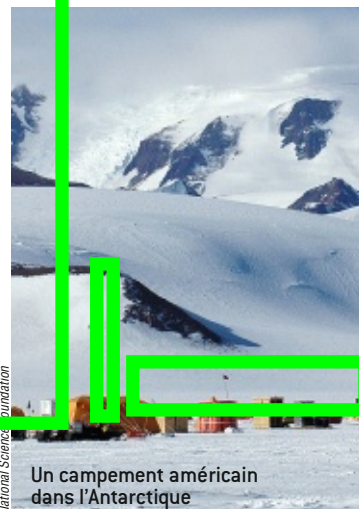
La plus haute montagne d'Antarctique, le mont Kirkpatrick (4528 mètres), a livré d'intéressantes informations sur les dinosaures. En 1991, l'équipe de W. Hammer avait prospecté à 4100 mètres d'altitude, où affleurent des roches sédimentaires du Jurassique inférieur. Elle y a découvert *Cryolophosaurus millenii*, un dinosaure carnivore de taille comparable à celle du tyrannosaure (voir la figure 5).

## Des dinosaures sous un climat doux

Depuis, les expéditions dans la chaîne Transantarctique se sont succédé et les restes d'un autre dinosaure, prosauropode cette fois (dinosaur à long cou et longue queue), ont été découverts dans la même zone. Il s'agit d'un gros herbivore de plusieurs tonnes : *Glacialisaurus hammeri*, ainsi nommé en l'honneur du pionnier de la paléontologie antarctique W. Hammer. D'autres ossements de dinosaures, ptérosaures (reptiles volants) ainsi qu'une dent de synapside ont également été exhumés sur les flancs du mont Kirkpatrick. Cette petite dent appartient à un groupe de reptiles plutôt herbivores et très proches des mammifères, les tritylodontes. La faune du mont Kirkpatrick suggère qu'un climat plutôt doux régnait en Antarctique au Jurassique inférieur, malgré des latitudes déjà très élevées. Cette faune n'est pas sans intriguer : quelle qu'ait été la

## Une mission française en Antarctique ?

✓ Une participation française à l'exploration paléontologique de l'Antarctique serait bienvenue, car la terrestrisation des vertébrés et l'évolution des écosystèmes avant et après les grandes crises biotiques sont étudiés en France depuis...  
 Il s'agirait par exemple de prospecter les formations d'une zone inexplorée de la chaîne Transantarctique. L'implantation du camp de base au pied des montagnes exigerait soit de prévoir une piste temporaire sur l'île de l'île orientale, soit de coopérer avec une nation possédant déjà un dispositif sur place ou assez proche.



National Science Foundation

Un campement américain dans l'Antarctique

température globale moyenne de l'époque à de si hautes latitudes, il devait geler durant la nuit. Comment les dinosaures locaux s'y étaient-ils adaptés ? Avaient-ils le sang chaud ?

Dès les premières découvertes paléontologiques effectuées par les Européens et les Argentins pendant l'âge d'or de l'exploration de l'Antarctique, le registre fossile du continent blanc s'est enrichi progressivement, particulièrement dans la péninsule Antarctique de par le travail des équipes argentines et britanniques. Et grâce aux efforts de pionniers tels que W. Hammer, l'exploration paléontologique de la chaîne Transantarctique a été fructueuse.

Outre l'enrichissement du registre fossile en amphibiens, dinosaures, oiseaux, reptiles et autres mammifères, le Graal de la paléontologie antarctique serait de découvrir un amphibien paléozoïque (le Paléozoïque couvre la période allant de 543 à 250 millions d'années), voire l'un des premiers tétrapodes terrestres. Les paléontologues se demandent en effet si l'une des étapes de la sortie des eaux des tétrapodes ne s'est pas jouée dans l'hémisphère Sud. La réponse à cette question consisterait notamment à déterminer les conditions environnementales ayant rendu possible cette transition majeure dans l'histoire de la vie terrestre. Il est clair que la paléontologie n'aurait qu'à gagner d'une exploration plus poussée de l'Antarctique, avec des missions où des géologues seraient étroitement associés à des paléontologues... de toutes écoles.



# les conférences

à la Cité des sciences et de l'industrie

accès gratuit sur inscription : [conferences@universcience.fr](mailto:conferences@universcience.fr)



à la Cité des sciences et de l'industrie

# La fin de la faim en 2050 ?

Un milliard de personnes dans le monde  
5 experts décideurs



# La fin de la faim en 2050 ?

Aujourd'hui, un milliard de personnes dans le monde ont faim. Qu'en sera-t-il en 2050 ? Experts, décideurs et étudiants se poseront les vraies questions, sans tabous, ni verrous.



colloque  
international

**VENDREDI 11 ET  
SAMEDI 12 MAI 2012**

universcience.fr



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



**CAMPUS**   
**CONDORCET**  
Paris - Asnières/Seine



IDDRI  
SciencesPo



SCIENCE  
AVENIR



**POUR LA  
SCIENCE**

France  
culture

0000-0001-9786-414X

# Des **INTERRUPTEURS** cachés dans le cerveau

Eric Nestler

**L'environnement et les expériences vécues contribueraient à l'apparition de maladies mentales par le biais des modifications épigénétiques, qui activent ou inhibent les gènes.**

## L'ESSENTIEL

✓ Les expériences vécues contribueraient à l'apparition de maladies mentales, par elles auraient pour conséquence le retrait ou l'addition de marques « épigénétiques » sur les chromosomes.

✓ Ces marques influent sur l'activité des gènes sans modifier l'information codée dans ces derniers.

✓ Les modifications épigénétiques ont une action prolongée dans des maladies, telles que la dépendance aux drogues et la dépression.

✓ Certains comportements maternels modifiés par épigénèse se retrouvent dans la descendance.

**M**a mère, le professeur Mitchell, son frère jumeau, Greg, est toxicomane. Pour ces deux garçons, qui ont grandi dans la région de Boston, tout allait bien au lycée: c'étaient des élèves brillants, qui s'entendaient bien avec leurs camarades et aimaient le sport. Comme beaucoup de jeunes de leur âge, les frères commencèrent à boire de la bière, à fumer des cigarettes et, à l'occasion, du cannabis. À l'université, ils essayèrent la cocaïne. Cette expérience allait briser la vie de Greg.

Dans son premier temps, il continua à mener une vie normale – assistant aux cours et restant en contact avec ses amis –, mais bientôt, la drogue devint son unique préoccupation. Il abandonna ses études et commença à vivre de petits boulots. Il conservait rarement un emploi plus d'un mois ou deux, se faisant renvoyer pour ses absences répétées ou des disputes avec des clients ou des collègues. Son comportement devint de plus en plus imprévisible – parfois violent – et il fut arrêté à plusieurs reprises pour des vols, qu'il commettait pour acheter sa drogue. Les tentatives de traitement échouèrent, et quand les tribunaux envoyèrent Greg, alors âgé

de 28 ans, dans un hôpital psychiatrique, celui-ci était sans ressources et sans domicile fixe: hébergé par sa famille et prisonnier de sa dépendance.

Qu'est-ce qui a rendu Greg aussi sensible aux effets de la cocaïne, au point que cette drogue détruisait sa vie? Et pourquoi son frère jumeau, qui partage les mêmes gènes, n'est-il échappé à la dépendance? Ces questions ne sont pas nouvelles, mais aujourd'hui, on a quelques réponses. Depuis une dizaine d'années, les biologistes, qui étudient le développement embryonnaire ou les cancers, s'intéressent aux mécanismes moléculaires qui permettent à l'environnement de modifier l'expression des gènes sans toucher à l'information qu'ils portent. Au lieu de provoquer des mutations, ces modifications « épigénétiques »

marquent les gènes et en modifient l'expression, parfois pour toute la vie.

Progressivement, nous découvrons comment les changements épigénétiques provoqués par la consommation de drogues ou un



stress chronique modifient les réponses du cerveau confronté à cette expérience: ils prédisposent un individu à résister ou à succomber à la dépendance, la dépression ou d'autres maladies psychiques. Nous commençons seulement à comprendre comment les gènes interagissent avec l'environnement, et nous espérons que ces recherches aboutiront à de nouveaux traitements pour ces maladies dévastatrices et permettront d'identifier les personnes à risque. Les modifications épigénétiques se transmettent d'une génération à l'autre.

## Au-delà des gènes

Les recherches sur les prédispositions génétiques à la dépendance aux drogues, la dépression, l'autisme, la schizophrénie et autres maladies psychiatriques ont commencé il y a longtemps. Comme la plupart des maladies courantes, ces troubles sont en partie héréditaires: on estime que le risque de dépendance ou de dépression serait pour moitié d'origine génétique – ce qui est supérieur au risque génétique pour l'hypertension ou la plupart des cancers. Mais les gènes n'expliquent pas tout: comme dans le cas de Craig et Matt, le fait de porter les gènes identiques ne garantit pas que deux individus auront – ou n'auront pas – la même maladie.

Les troubles psychiatriques se manifestent chez les individus génétiquement prédisposés particulièrement sensibles à des signaux issus de l'environnement – des

© Shutterstock/JPRRA / Custom media / Vpam

drogues ou le stress, par exemple –, voire à des modifications des chaînes moléculaires qui peuvent se produire, par hasard, au cours du développement. Deux individus n'auront jamais le même développement embryonnaire et ne vivront jamais exactement les mêmes expériences.

Dès lors, par quels mécanismes ces signaux environnementaux peuvent-ils déclencher une maladie mentale ? Les neurones du cerveau centralisent d'innombrables signaux, échangeant des composés chimiques – les neurotransmetteurs, avec les autres neurones pour réagir à chaque expérience – que ce soit regarder un film, serrer quelqu'un dans ses bras, prendre de la cocaïne ou penser au menu du dîner. Les neurotransmetteurs activent ou inhibent de multiples cellules et influent sur l'expression de nombreux gènes. Comprendre le lien entre les neurotransmetteurs et les gènes activés nous aide à préciser comment les neurones réagissent à l'environnement et modulent le comportement.

Ces effets sont souvent très brefs. Par exemple, une exposition à la cocaïne active le circuit cérébral de la récompense, dont le noyau accumbens est un élément clé, conduisant à une euphorie temporaire. Cette sensation s'affaiblit rapidement, car le système revient à la normale. Mais on ignore encore pourquoi des drogues, le stress ou d'autres expériences traumatiques peuvent avoir des effets à long terme, par exemple une dépression ou une dépendance. De nombreux chercheurs pensent que les mécanismes épigénétiques jouent un rôle notable.

## Les marques épigénétiques

Pour comprendre pourquoi l'épigénèse a attiré notre attention, rappelons comment est régulée l'activité des gènes. Schématiquement, un gène est une séquence d'ADN imposant la composition d'une protéine. Les protéines assurent la plupart des processus biologiques, contrôlant le fonctionnement des cellules. Dans le noyau cellulaire, cet ADN n'est pas replié au hasard. Au contraire, il est enroulé autour d'amas de protéines nommées histones – comme du fil sur une bobine – et forme ensuite des « paquets » qui constituent les chromosomes. L'ensemble des protéines et de l'ADN dans les chromosomes forme la chromatine.

Cet arrangement n'est pas seulement la bonne organisation du noyau cel-

lulaire. Il permet de contrôler le comportement des gènes. Quand l'arrangement est compact, les gènes sont généralement silencieux, empêchant l'accès de la machinerie qui transcrit les gènes en brins d'ARN. Dans un neurone, par exemple, les gènes qui codent les enzymes du foie ne doivent pas s'exprimer et sont donc enfouis dans des régions chromosomiques compactes. Quand un gène est nécessaire, la portion d'ADN où il se trouve se relâche, ce qui permet à la machinerie cellulaire de transcrire l'ADN en ARN. Cet ARN sert de modèle pour la production de la protéine codée par le gène.

L'état dans lequel se trouvent les gènes – condensé (ne pouvant être traduits en protéines de façon temporaire ou permanente) ou décondensé (prêts à produire des protéines) – est influencé par des marques épigénétiques, des molécules qui se fixent sur les histones ou sur l'ADN lui-même. Ces marques créent une sorte de code qui indique le degré de compacité de la chromatine et, par là-même, si les gènes sous-jacents doivent ou non être transcrits (voir l'encadré ci-contre). Un gène peut être plus ou moins actif, suivant la façon dont est marquée sa chromatine.

Les modifications épigénétiques sont effectuées par diverses enzymes. Certaines ajoutent ces marques chimiques et d'autres les retirent. David Allis, de l'Université Rockefeller, les a respectivement surnommées les « scripteurs » et les « effaceurs » du code épigénétique. Par exemple, une enzyme, l'histone acétyltransférase, qui fixe des groupes acétyle sur les histones, est un scripteur, et l'histone désacétylase, qui retire cette marque, un effaceur.

Ces marques attirent ensuite d'autres protéines qui agissent comme « lecteurs » : elles se lient à des marques épigénétiques spécifiques et peuvent décompacter ou condenser la chromatine environnante en recrutant d'autres protéines de régulation qui stimulent la transcription des gènes concernés ou l'empêchent.

Les histones portant de nombreux groupes acétyle, par exemple, attirent des lecteurs, qui ont tendance à décompacter la chromatine, et d'autres protéines, qui favorisent l'activation des gènes. Inversement, les histones portant beaucoup de groupes méthyle attirent des lecteurs qui peuvent soit stimuler, soit empêcher la transcription, selon la position de ces groupes. Ainsi, l'environnement peut influencer sur l'activité des gènes en régulant le comportement des scripteurs et des effa-

ceurs épigénétiques – et donc le marquage et la structure de la chromatine.

Parfois, ces marques se fixent très peu de temps, par exemple juste pour permettre à un neurone de réagir rapidement à une stimulation intense en produisant une bouffée de neurotransmetteurs. Souvent, les marques restent en place pendant des mois ou des années – voire pendant toute la vie quand il s'agit, par exemple, de renforcer ou d'affaiblir les connexions neuronales impliquées dans la formation et le stockage des souvenirs.

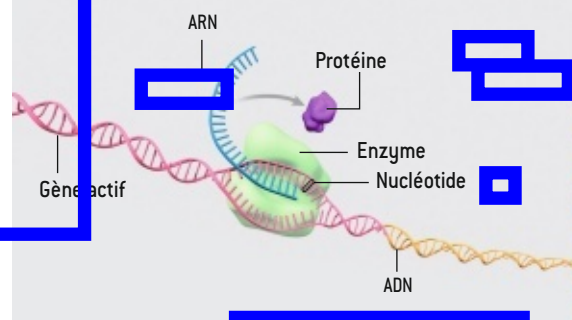
Ajouter (ou retirer) des groupes acétyle et méthyle – et d'autres marques – à la chromatine permet au cerveau de réagir et de s'adapter. Aujourd'hui, on découvre, chez l'animal, que ces mécanismes épigénétiques bénéfiques peuvent être perturbés dans des troubles, tels que la dépendance et la dépression, où des modifications épigénétiques anormales pourraient mettre en place des comportements inadaptés. L'examen de tissu cérébral humain, prélevé *post mortem*, suggère qu'il pourrait en être de même chez l'homme.

Les découvertes liées à la dépendance sont fondées sur notre connaissance, déjà

**Les modifications épigénétiques des gènes diffèrent des mutations génétiques. Elles peuvent perturber le fonctionnement du cerveau et de divers organes.**

**Les mutations génétiques modifient généralement le sens du message codé**

La séquence des nucléotides d'un gène impose la constitution de la protéine qu'il code. Quand un nucléotide est erroné ou qu'une mutation est présente dans le gène, la protéine codée a une forme ou une fonction anormale. Il est également possible qu'elle soit synthétisée en excès ou, au contraire, en trop faible quantité.



ancienne, de la façon dont les drogues perturbent le circuit cérébral de la récompense. De nombreuses études ont permis d'identifier des changements notables d'activation des gènes en présence de cocaïne, d'opiacés et autres drogues. On a montré que certains de ces changements dans l'expression des gènes persistent même après plusieurs mois d'abstinence, bien que les chercheurs ne sachent pas pourquoi.

## Des gènes activés, d'autres éteints

Étant donné les effets à long terme que peuvent avoir les modifications épigénétiques, nous avons entrepris, il y a une dizaine d'années, d'examiner si la cocaïne pouvait modifier le marquage épigénétique des gènes dans le système de la récompense. Cette drogue puissante crée une dépendance aussi bien chez l'homme que chez l'animal, ce qui permet l'étude en laboratoire de ses effets à long terme.

Une dose unique de cocaïne provoque des changements importants dans l'expression de nombreux gènes. Ces modifications sont induites par les

concentrations d'ARN messager, témoin direct de l'expression des gènes. Une heure après la première injection de cocaïne à des souris, près de 100 gènes sont activés. Ce qui se passe lorsque les animaux sont exposés de façon chronique à cette drogue est encore plus intéressant. Quelques-uns des gènes activés par une première injection deviennent silencieux si cette drogue est administrée tous les jours. Ces gènes sont « désensibilisés ».

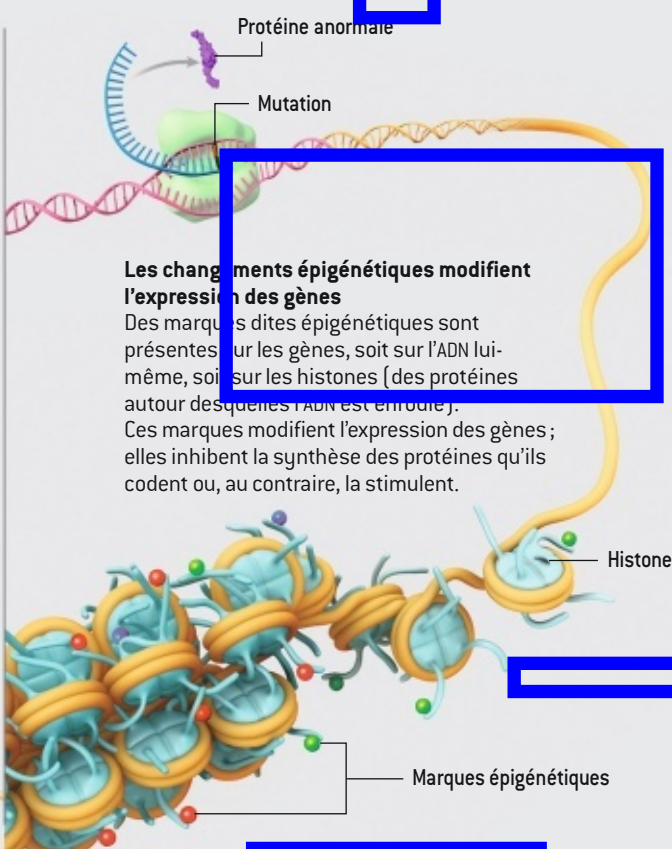
Cependant, d'autres gènes – en plus grand nombre – font exactement l'inverse : ils sont temporairement activés par une première exposition à la cocaïne, mais une exposition chronique, loin de diminuer leur activité, l'augmente bien davantage – dans certains cas, pendant des semaines après la dernière injection. Qui plus est, ces gènes restent très sensibles à la cocaïne même après une longue période où l'animal n'a plus été exposé à la drogue. Ainsi, l'usage chronique de la cocaïne prépare des gènes à une future activation, ce qui leur permettant de se « souvenir » des effets de la drogue. Cette « réceptivité favorise aussi la rechute, et joue le rôle de la dépendance. Or cette

## L'AUTEUR



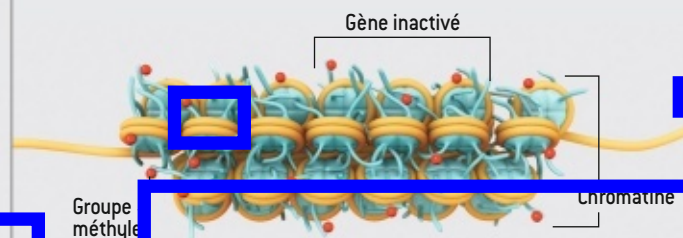
Eric NESTLER, professeur de neurosciences, dirige l'Institut Friedman de recherche sur le cerveau de l'Hôpital Mount Sinai à New York.

## GÉNÉTIQUE ET ÉPIGÉNÉTIQUE



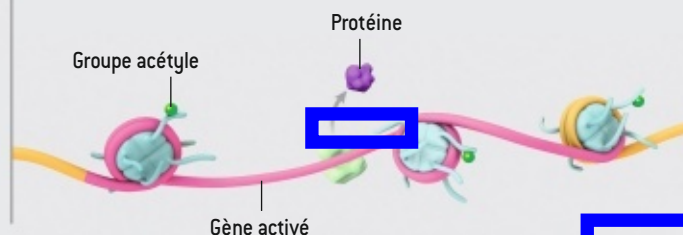
### Inactivation

Certaines marques épigénétiques inhibent les gènes, car, en leur présence, la chromatine (de l'ADN complexé avec des histones et diverses protéines) est compactée, ce qui empêche que les gènes s'expriment. Les groupes méthyle jouent parfois ce rôle.



### Activation

D'autres marques, tels les groupes acétyle, stimulent l'expression des gènes en déroulant la chromatine.



sensibilité exacerbée résulte de modifications épigénétiques des gènes.

Nous avons répertorié les marques épigénétiques sur la totalité du génome de la souris, et nous avons montré que l'administration chronique de cocaïne reconfigure les marques acétyle et méthyle sur des centaines de gènes dans le système de la récompense. Ces changements tendent à décompacter la chromatine, ce qui rend ces gènes plus facilement activables lors d'une nouvelle exposition à la cocaïne. Beaucoup de ces changements sont temporaires – ne durant que quelques jours après la prise de la drogue. Toutefois, certains durent beaucoup plus longtemps :

un mois, voire davantage. Nous commençons à comprendre le mécanisme responsable de ces changements de longue durée. Nous avons découvert que l'administration chronique de cocaïne freine l'activité de certains effaceurs (qui retirent les groupes acétyle), ainsi que de certains scripteurs (qui ajoutent des groupes méthyle inhibiteurs). La chromatine qui est très acétylée – ou peu méthylée – reste dans un état plus lâche, rendant ses gènes plus faciles à activer.

L'exposition chronique à la cocaïne modifie aussi l'activité d'autres scripteurs et effaceurs dans le circuit de la récompense, en y laissant un ensemble de marques

épigénétiques qui favorisent l'expression des gènes. Pour le confirmer, nous avons modifié l'activité de ces scripteurs et effaceurs afin d'imiter les effets de l'usage chronique de la drogue. Nous avons constaté que, même en l'absence de drogue, les animaux deviennent plus sensibles aux effets agréables de la cocaïne – l'un des signes de la dépendance.

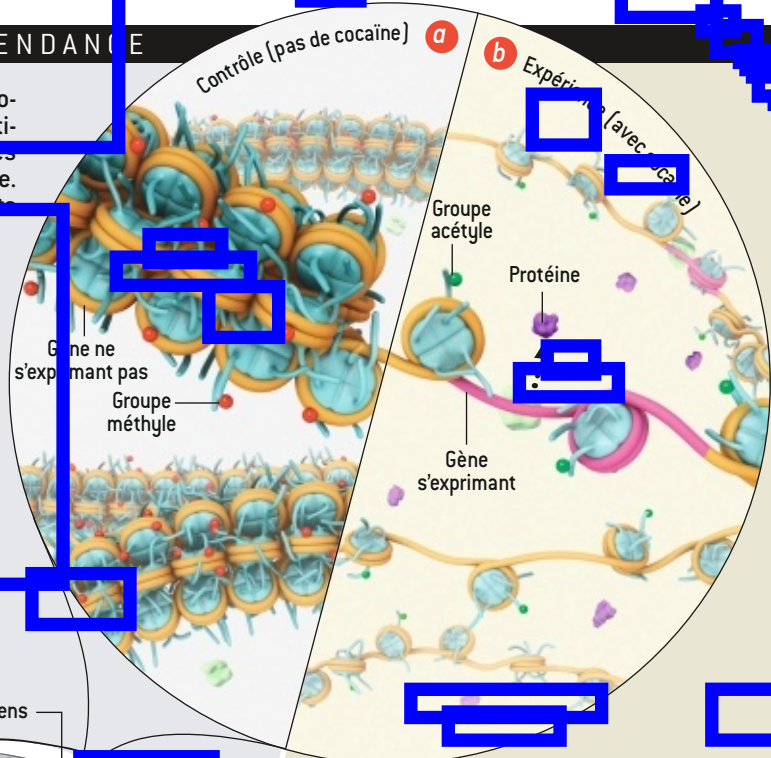
Les changements d'activité des scripteurs et des effaceurs, à la suite de l'usage chronique de cocaïne, durent longtemps, ce qui pourrait expliquer les changements à long terme de l'expression des gènes marqués. Comme le circuit cérébral de la récompense est lié à une large gamme de

## L'ÉPIGÉNÉTIQUE DE LA DÉPENDANCE

Des études chez la souris ont montré qu'une exposition chronique à la cocaïne modifie la répartition des marques épigénétiques sur les gènes situés dans le circuit cérébral de la récompense. Les animaux deviennent plus sensibles aux effets de la drogue et plus enclins à la dépendance.

### Les modifications

Même une dose unique de cocaïne peut modifier le « paysage » épigénétique des gènes dans le noyau accumbens, un élément essentiel du circuit de la récompense. En l'absence de drogue (a), les groupes méthyle prédominent, maintenant la chromatine compactée de sorte que les gènes ne s'expriment pas. En présence de cocaïne, les groupes acétyle prédominent et la chromatine se décompacte (b) : de nombreux gènes codant des protéines impliquées dans la sensation de plaisir déclenchée par la drogue s'expriment.



Noyau accumbens

PAS DE COCAÏNE

Forte

Expression

Faible

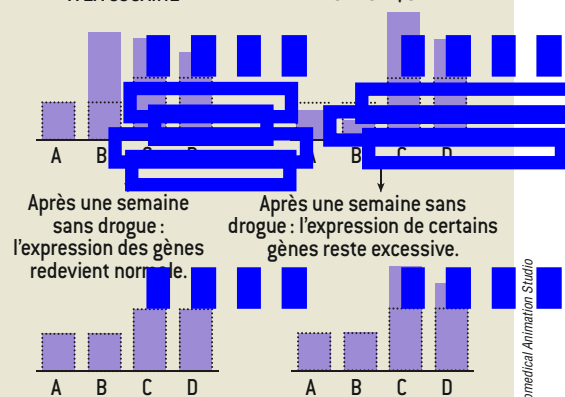
Gène

### Des effets durables

Une première exposition à la cocaïne augmente temporairement l'expression de nombreux gènes (B, C et D, à droite), mais cette expression se normalise rapidement. L'exposition chronique à la cocaïne a des effets plus complexes : elle rend certains gènes moins sensibles à la drogue (A et B, à l'extrême droite), alors qu'elle stimule l'expression d'autres gènes, la rendant plus forte qu'avant (C et D). L'expression de certains de ces gènes reste excessive pendant un temps anormalement long.

PREMIÈRE EXPOSITION À LA COCAÏNE

EXPOSITION CHRONIQUE



stimulus – par exemple, la nourriture et le sexe –, la manipulation de l'activité des neurones de ce centre peut modifier notablement le comportement d'un animal.

Les adaptations neuronales qui modifient le comportement à long terme sont aussi responsables d'une maladie mentale fréquente, chronique et handicapante : la dépression. Comme pour la dépendance, on peut étudier cette maladie chez l'animal.

## Stress et dépression

Nous travaillons sur des souris – des mâles placides – qui ont été mises en présence de souris agressives. Après dix jours de « persécutions » de la part de leurs congénères, les souris non agressives présentent de nombreux signes de dépression : elles ne pratiquent plus les activités qu'elles apprécient normalement (copuler, manger des friandises), elles deviennent anxieuses, se replient sur elles-mêmes ; elles sont moins aventureuses et, parfois même, mangent trop et deviennent obèses. Certains de ces changements perdurent pendant des mois et peuvent être inversés par administration régulière des antidépresseurs utilisés chez l'homme.

En étudiant de plus près l'ADN de ces souris, nous avons observé des changements épigénétiques sur 2000 gènes environ du système de la récompense. Pour 1200 de ces gènes, nous avons mesuré une augmentation d'une marque épigénétique, une forme de méthylation de l'histone qui inhibe l'expression du gène. Il semble donc que la dépression inactive-rait des gènes importants pour les aires cérébrales qui permettent à un animal de se sentir bien, créant une sorte de « cicatrice moléculaire ». Nous avons découvert que beaucoup de ces changements déclenchés par le stress pouvaient être gommés en traitant les souris pendant un mois avec de l'imipramine, un antidépresseur couramment prescrit. On a observé, *post mortem*, des changements épigénétiques similaires sur le cerveau de personnes déprimées au moment de leur décès.

Bien que la dépression soit fréquente, tous les individus n'y sont pas sensibles de la même façon. Nous avons découvert qu'il en est de même chez les souris. Un tiers environ des mâles, confrontés à un stress social quotidien, résistent à la dépression : bien qu'ils soient sujets au même stress incessant, ils ne montrent aucun des signes de répétition du *l'An-*

thie ne sont pas sensibles à la dépression. Les gènes jouent un rôle important dans cette résilience. De nombreux changements épigénétiques induits par le stress que nous observons chez les souris sensibles n'apparaissent pas chez les souris résilientes. En revanche, ces dernières présentent des modifications épigénétiques sur d'autres gènes du système de récompense. Cela suggère que ces modifications protègent l'animal, et que la résilience est plus qu'une simple absence de vulnérabilité à cette réponse épigénétique active contrecarrant les effets du stress chronique.

Nous avons également découvert que les gènes protecteurs qui sont épigénétiquement modifiés chez les souris résilientes influent bon nombre des gènes dont l'activité est restaurée chez les souris déprimées traitées par l'imipramine. Un sous-ensemble de ces gènes est connu pour augmenter l'activité du circuit de la récompense et éviter la dépression. Ces observations laissent supposer que les antidépresseurs activent certains programmes épigénétiques protecteurs, à l'œuvre chez les personnes résistantes à la dépression. Si tel est le cas, on pourrait chercher des substances qui inhibent les effets néfastes du stress chronique, mais qui stimulent également les mécanismes naturels de résilience du cerveau.

Nous avons évoqué des effets qui perdurent un mois – les périodes les plus longues que nous ayons étudiées. Toutefois,

passives. En outre, les femelles élevées par des mères attentionnées deviennent elles-mêmes des mères actives.

L'équipe de M. Meaney a montré que les effets du comportement maternel sont transmis, au moins en partie, par des mécanismes épigénétiques. Par rapport aux petits élevés, les petits élevés par des mères passives présentent plus de méthylation de l'ADN dans les séquences de régulation d'un gène codant le récepteur des glucocorticoïdes – des protéines présentes dans la plupart des cellules, essentielles dans les réactions d'un animal à l'hormone de stress, le cortisol. Une méthylation excessive – détectée dans l'hippocampe, une région cérébrale intervenant dans l'apprentissage et la mémoire – diminue la quantité de ces récepteurs produits par les neurones.

## Un héritage maternel

Les récepteurs, en nombre insuffisant à cause de modifications épigénétiques, ne parviennent plus à ralentir la production de cortisol. La réaction au stress de ces animaux est exacerbée, ce qui les rend plus anxieux et craintifs – des traits de caractère qui persistent durant toute leur vie. D'autres gènes pourraient subir des influences épigénétiques similaires. Francis Champagne, de l'Université

Columbia, et ses collègues ont trouvé des différences épigénétiques dans le gène codant le récepteur des estrogènes chez

## CERTAINES MODIFICATIONS ÉPIGÉNÉTIQUES provoquent des changements de comportement qui durent toute la vie de l'individu et se transmettent à sa progéniture.

certaines modifications épigénétiques provoquent des changements de comportement qui durent toute la vie, comme l'ont montré Michael Meaney, de l'Université McGill, et ses collègues. M. Meaney a étudié les effets des soins maternels sur les modifications épigénétiques et le comportement ultérieur de la progéniture.

Ils ont observé que certaines ratte ont un comportement maternel très développé, échant et s'occupant beaucoup de leurs petits. Les autres mères sont plus passives. Les petits des mères actives sont moins anxieux et produisent moins d'hormones de stress lorsqu'ils sont perturbés que les petits élevés par des mères

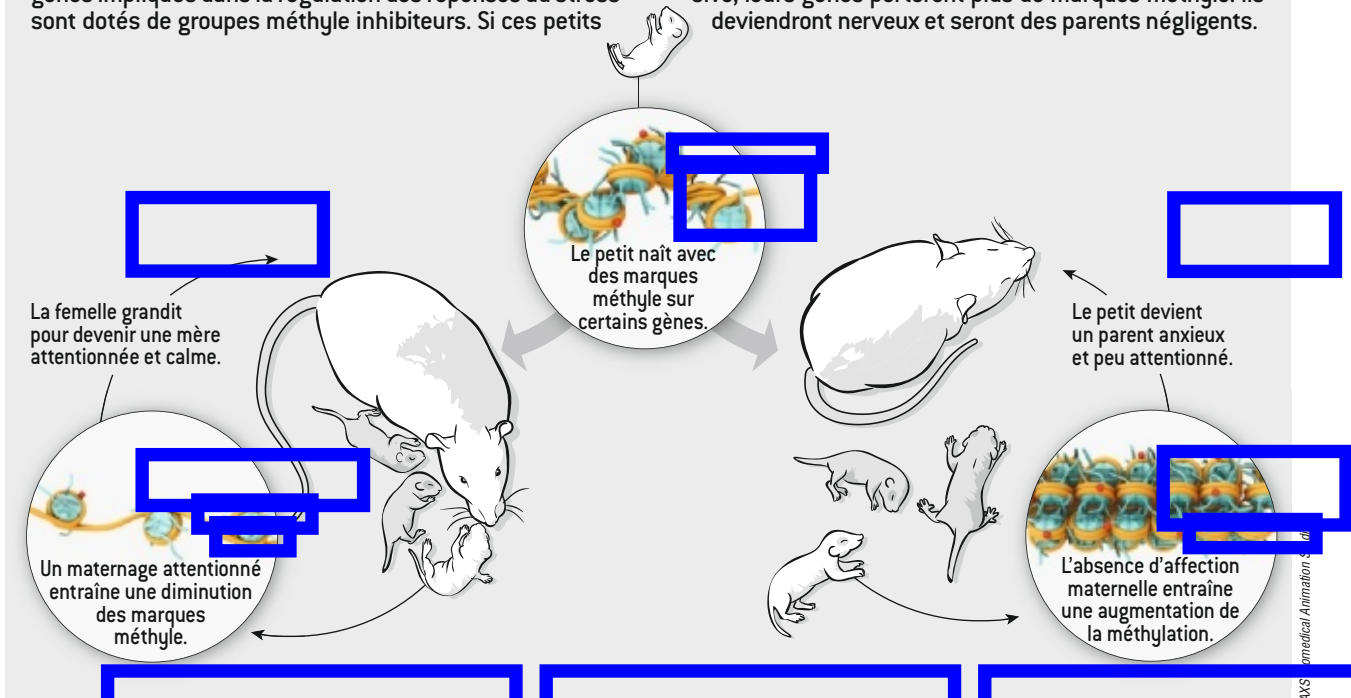
les petits élevés par des mères actives et par des mères passives. Il est probable que de nombreux gènes subissent des modifications épigénétiques résultant du comportement maternel.

Ainsi, les changements épigénétiques seraient transférés d'une génération à la suivante, apparemment sans être transmis par les ovules ou les spermatozoïdes. Quand le comportement d'une mère modifie la régulation épigénétique dans le cerveau d'un de ses petits, ce dernier présente le même comportement que sa mère, lequel modifie les marques épigénétiques et, par conséquent, le comportement de ses petits, et ainsi de suite.

## DE LA MÈRE AUX PETITS

Des études sur les rats ont montré que l'épigenèse influe sur le comportement maternel et que cet effet peut être transmis d'une génération à la suivante sans modifier les cellules germinales, mais en agissant uniquement sur le cerveau des petits. Ces derniers naissent sensibles au stress, car les gènes impliqués dans la régulation des réponses au stress sont dotés de groupes méthyle inhibiteurs. Si ces petits

sont élevés par une mère détendue et attentionnée, leurs gènes seront moins méthylés, ce qui rend ces animaux plus calmes. Lorsque ces petits deviendront adultes, ils seront eux aussi, des parents détendus et attentionnés. En revanche, si les petits sont élevés par une mère craintive et passive, leurs gènes porteront plus de marques méthyle. Ils deviendront nerveux et seront des parents négligents.



AXS Medical Animation S

Pourrait-on utiliser ce que nous découvrons sur ces modifications épigénétiques et le comportement pour traiter les maladies mentales ? De nombreuses équipes ont observé que des molécules qui maintiennent les histones riches en groupes acétyle – en inhibant les enzymes qui effacent ces marques – ont des effets antidépresseurs puissants. En outre, bien que le maternage passif soit associé à des changements de méthylation de l'ADN, M. Meaney a découvert que ces mêmes substances stimulent le comportement attentionné (car une acétylation importante des histones peut contrecarrer les effets inhibiteurs d'une méthylation excessive de l'ADN).

### Après la thérapie génique, la thérapie épigénétique ?

Ces résultats sont prometteurs, mais les inhibiteurs actuellement disponibles ne sont probablement pas utiles pour combattre la dépression. Les effaceurs de l'acétyle – les histone désacé-

tylases – régulent les marques épigénétiques dans les cellules du cerveau et de l'organisme, et donc les molécules qui les inhibent sans distinction peuvent avoir des effets secondaires graves, voire être toxiques. Une solution consisterait à fabriquer des médicaments capables d'inhiber sélectivement les histones désacétylases concentrés dans les zones du cerveau les plus perturbées dans les troubles psychiatriques, tel le circuit de la récompense. Une autre option serait d'identifier les nouvelles protéines mises en jeu par les modifications épigénétiques dans le cerveau. Toutefois, l'approche la plus intéressante pourrait être de déterminer les gènes ayant subi des modifications épigénétiques dans la dépression ou la dépendance : par exemple, des gènes codant des récepteurs de neurotransmetteurs spécifiques ou des protéines impliqués dans l'activation neuronale. Nous pourrions alors concentrer nos efforts sur la conception de médicaments qui ciblent ces gènes particuliers.

Nous devons également nous demander dans quelle mesure les changements

épigénétiques accompagnant les maladies neuropsychiatriques sont héréditaires. Dans les expériences de M. Meaney, les rats « héritent » de certains schémas comportementaux de leur mère – et des profils épigénétiques associés. Mais ces changements, influencés par le comportement, se produisent dans le cerveau. Peuvent-ils être transmis par les cellules germinales qui forment un nouveau embryon ?

### Des modifications épigénétiques transmises

Il est probable que le stress chronique ou une drogue modifient l'activité des gènes dans les spermatozoïdes ou les ovules ; après tout, les hormones du stress et les drogues ne restent pas confinées dans le cerveau, mais circulent dans tout l'organisme, y compris les testicules et les ovaires. Cependant, nous comprenons mal comment un tel changement dans les cellules sexuelles pourrait être transmis de génération en génération. Les modifi-

cations épigénétiques acquises sont effacées au cours des divisions cellulaires qui créent les cellules germinales. Par ailleurs, comment ces modifications, si elles sont présentes dans un embryon, pourraient-elles modifier l'activité des gènes uniquement dans certaines régions du cerveau ou dans des organes particuliers ?

Et pourtant, certaines études laissent penser que les modifications épigénétiques pourraient être en partie héréditaires. Plusieurs équipes ont découvert que des rongeurs stressés de façon chronique donnent naissance à une progéniture très sensible au stress. Par exemple, Isabelle Mansuy, de l'Université de Zurich, et ses collègues ont séparé des souriceaux de leur mère alors qu'ils n'avaient pas 15 jours, et ont découvert qu'à l'âge adulte la progéniture mâle montrait des signes de dépression. Quand ces mâles sont croisés avec des souris femelles « normales », leurs descendants, non soumis au stress durant leur jeunesse, présentent aussi des signes de dépression quand ils atteignent l'âge adulte. Cette transmission de la sensibilité au stress est reliée à une modification des taux de méthylation de l'ADN sur plusieurs gènes spécifiques, à la fois dans le sperme et dans le cerveau.

Nous avons réalisé une expérience similaire en utilisant notre modèle de souris stressées : nous avons soumis des mâles à un stress chronique. Puis nous avons attendu un mois, laissant ces mâles s'accoupler, et nous avons découvert que leur progéniture présentait une augmentation très importante de la sensibilité à la dépression. Si les modifications épigénétiques étaient vraiment héréditaires, ces changements devraient être inscrits dans les cellules sexuelles de ces animaux. Nous avons prélevé du sperme de ces mâles « persécutés » et nous l'avons utilisé pour féconder les ovules d'une femelle non stressée. Les jeunes issus de cette union artificielle étaient quasi normaux : ils ne montraient que de légers signes de comportement de repli sur soi et d'anxiété, alors que les caractéristiques étaient très présentes chez les pères.

Cette expérience ne suffit pas pour conclure : nous ignorons si les marques épigénétiques sont préservées dans le sperme lors du processus de fécondation *in vitro*. Cependant, elle suggère que les femelles ont un comportement différent avec leurs petits selon qu'elles se sont accouplées avec des mâles stressés ou pas.

mâles normaux ou qu'elles ont été fécondées artificiellement. Par conséquent, la dépression de la progéniture proviendrait du comportement maternel et non d'un « héritage » épigénétique transmis par les cellules germinales.

Cela ne veut pas dire qu'une telle transmission de génération en génération est impossible. Mais aujourd'hui, nous

## COMMENT LES MODIFICATIONS ÉPIGÉNÉTIQUES

se transmettent-elles à la descendance ?

Nous l'ignorons, et devons mettre au point les outils permettant de les repérer dans les cellules sexuelles.

n'avons aucune preuve qu'elle se produit réellement. Pour conclure que les modifications épigénétiques sont héréditaires, nous devons mettre au point des outils permettant d'identifier les modifications épigénétiques pertinentes dans les cellules germinales... et d'établir que ces modifications sont à la fois suffisantes et suffisantes pour transmettre le caractère étudié.

## Lamarck, le père de l'épigénèse ?

Le biologiste français Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829) est connu pour sa théorie de l'hérédité des caractères acquis. Selon cette hypothèse, des caractéristiques que des organismes acquièrent durant leur vie – une forte musculature, par exemple – peuvent être transmises aux descendants. Bien sûr, nous savons aujourd'hui qu'une musculature développée acquise par un individu ne devient pas héréditaire. Et pourtant, les scientifiques continuent de plus en plus à considérer que l'exposition à l'environnement et à différentes expériences durant le développement, mais aussi à l'âge adulte, peut modifier l'activité des gènes et, en conséquence, la façon dont ces caractères se manifestent. Or les mécanismes épigénétiques sont les médiateurs de cette interaction. Il nous reste encore à comprendre jusqu'à quel point l'épigénèse influe sur nos caractéristiques comportementales et notre sensibilité aux maladies mentales, et dans quelle mesure ce type de sensibilité peut être transmis à notre descendance. Lamarck et ses détracteurs auraient certainement été ravis de participer à ce débat !

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

I. Maze et B. J. Nestler, *The epigenetic landscape of addiction*, *Nature Reviews of the New York Academy of Sciences*, vol. 1216, pp. 99-113, 2011.

T. B. Frankland et al., *Epigenetic transmission of the impact of early stress across generations*, *Biological Psychiatry*, vol. 68, n° 5, pp. 408-414, 2010.

N. M. Cameron et al., *Epigenetic programming of phenotypic variations in reproductive strategies in the rat through maternal care*, *Journal of Neuroendocrinology*, vol. 20, n° 6, pp. 791-801, 2008.

N. Tsankov et al., *Epigenetic regulation in psychiatric disorders*, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, pp. 355-367, 2007.

# Assurer l'avenir du CHOCOLAT

Harold Schmitz et Howard-Yana Shapiro

Afin de répondre à la demande croissante en cacao, les scientifiques tentent d'augmenter le rendement des cultures, notamment en renforçant la résistance des cacaoyers aux maladies et aux insectes ravageurs.

## L'ESSENTIEL

- ✓ La demande de chocolat est de plus en plus grande et risque de dépasser l'offre.
- ✓ Le rendement des cultures est diminué par les insectes ravageurs, les maladies, les épisodes climatiques extrêmes et le manque de moyens et de formation des cultivateurs.
- ✓ Les chercheurs essaient d'accroître la résistance du cacaoyer par des croisements sélectifs. En parallèle, des formations sont mises en place, et de nouvelles techniques de plantation d'irrigation et de lutte contre les nuisibles sont développées.

Adam Corfies





**P**our la Mayan, c'était la nourriture des dieux. Au XIX<sup>e</sup> siècle, les Cubains l'employaient comme aphrodisiaque. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'experte culinaire américaine Fannie Farmer le recommandait en cas de digestion difficile. Aujourd'hui encore, on lui attribue mille vertus : antidépresseur, protection contre les maladies cardiovasculaires, etc. À travers l'histoire, nombreux sont ceux qui ont vanté les mérites du cacao, l'ingrédient de base du chocolat.

Au-delà de ces mérites, réels ou supposés, et de son attrait pour son goût, le cacao joue un rôle socio-économique important : dans les pays tropicaux, cinq à six millions d'agriculteurs vivent de la culture des cacaoyers (*Theobroma cacao*), les arbres dont les fruits fournissent les fèves de cacao ; ces fèves extraites de cabosses ovoïdes d'une vingtaine de centimètres de longueur (voir la figure 1) sont mises à fermenter et à sécher, puis sont torréfiées pour en faire de la poudre, du beurre et de la liqueur de cacao.

Au total, 40 à 50 millions de personnes doivent leur subsistance à la filière du cacao, qui va des fermes aux étalages des magasins. En Côte d'Ivoire, cette culture représente 15 pour cent du PIB et occupe 5 pour cent des ménages. Quelque 40 pour cent du cacao mondial y est produit, un chiffre qui monte à 70 pour cent si l'on inclut les productions du Ghana, du Nigeria et du Cameroun.

Les ventes annuelles de chocolat s'élèvent à plus de 68 milliards d'euros. La demande devrait encore augmenter, en raison de la croissance de la population mondiale et de l'augmentation du niveau de vie dans les pays en développement, où de plus en plus de personnes peuvent en acheter. L'offre devra alors également augmenter : selon les fabricants, le secteur produit environ 3,7 millions de tonnes de cacao aujourd'hui, tandis que la demande devrait grimper à quatre millions de tonnes d'ici 2020.

Depuis, des maladies et des insectes ravageurs menacent les cultures. En 1988, par exemple, la maladie nommée balai de sorcière, causée par le champignon *Crinipella perniciosa*, a touché la région de Bahia, au Brésil. La production y a chuté de 80 pour cent. Si une maladie aussi virulente était introduite en Afrique de l'Ouest, par accident ou

#### 1. LE CHOCOLAT EST FABRIQUÉ

à partir de poudre de cacao, tirée des fèves du cacaoyer.

Ces fèves sont extraites de cabosses ovoïdes d'une vingtaine de centimètres de longueur (à gauche).

## LES AUTEURS



Harold SCHMITZ est conseiller scientifique de l'entreprise américaine Mars.

Howard-Yaniv SHAPIRO est chercheur chez Mars et professeur assistant en biologie végétale à l'Université de Californie à Davis.



© Shutterstock/kaband

par un acte de bioterrorisme, les conséquences pourraient être désastreuses...

Face aux nuisibles et au risque de sous-production, les cultivateurs manquent de moyen et de formation; engrais et fongicides ne sont pas assez utilisés, particulièrement en Afrique. Dès lors, les rendements agricoles ne sont qu'au tiers de leur potentiel, voire moins.

L'accroissement durable de ces rendements est au centre de multiples efforts. Certains travaux impliquent une collaboration entre cultivateurs, grandes entreprises, universités et organismes gouvernementaux. Plusieurs projets ont par exemple séquencé les génomes de diverses variétés de cacaoier, l'objectif étant de créer des arbres plus résistants.

Ces efforts suffisent-ils face aux défis qui se posent à la filière du cacao?

L'avenir le dira, mais les premiers signes sont encourageants.

## Le cacao pris d'assaut

Le cacaoier trouve son origine en Haute-Amazonie, à l'actuel emplacement de l'Équateur. Il a été importé au Mexique et domestiqué par les Olmèques (de 1250 à 500 avant notre ère), avant d'être transmis aux civilisations suivantes. Les marins portugais et espagnols ont ensuite emmené l'arbre dans leurs colonies d'Afrique et d'Asie.

Aujourd'hui, le cacaoier ne pousse toujours que dans une bande étroite, près de l'équateur, à des latitudes comprises entre 18 degrés Nord et 18 degrés Sud. Il préfère les sols riches et bien drainés (où l'eau s'évapore facilement), assez rares dans les Tropiques. Outre les faibles rendements, la filière est donc confrontée à l'étroitesse des zones où la culture du cacao est praticable.

L'arbre a besoin de chaleur et d'humidité, des conditions qui favorisent les maladies fongiques, virales et parasitaires. Ainsi, le balai de sorcière a décimé les cacaoiers de la région de Bahia, au Brésil. Aujourd'hui, une autre maladie fongique, la moniliose (due au champignon *Moniliophthora roreri*), se propage dans toute l'Amérique latine et pourrait bientôt atteindre le Brésil, où elle risque de causer encore plus de dégâts que le balai de sorcière.

Dans les autres régions de culture, les périls sont aussi nombreux, tels le virus CSSV (*cocoa swollen-shoot virus*, ou virus de gonflement des tiges du cacaoier) en

Afrique de l'Ouest et l'insecte *Conopomorpha cramerella*, aussi nommé foreur de cabosses de cacao, en Asie du Sud-Est; ce dernier, dont les larves se nourrissent des fèves, occasionne régulièrement des pertes de plus de 450 millions d'euros par an. Les cacaoiers du Ghana sont attaqués par des insectes ravageurs, par la pourriture brune des cabosses (une maladie fongique) et par le virus CSSV. Les experts craignent que ces fléaux aient déjà atteint les arbres de la Côte d'Ivoire voisine. Ils redoutent que l'Afrique et l'Asie soient frappées aussi durement que le Brésil.

Au-delà des difficultés actuelles, les conditions environnementales semblent empirer. Les événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et les vents de tempête ont toujours compliqué l'agriculture dans les Tropiques. Le changement climatique commence à intensifier ces extrêmes: déjà, en Indonésie, les pluies de mousson annuelles deviennent plus intenses sur des périodes plus courtes, endommageant souvent les fleurs des cacaoiers et empêchant la formation des cabosses.

Les événements climatiques extrêmes pourraient aussi aggraver les infestations et les maladies, tout en perturbant l'approvisionnement en eau. En Afrique, l'agriculture pluviale (sans irrigation) est employée pour la vaste majorité des cultures, dont celles de cacaoiers, et le rapport 2007 du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) prévoit que d'ici 2020 son rendement pourrait chuter de 50 pour cent par endroits. Le même rapport annonce des hausses de température et une diminution de la quantité d'eau douce dans certaines régions d'ici 2050.

Selon Peter Läderach, du Centre international de l'agriculture tropicale (CIAT), les régions propices à la culture du cacao migreront vers des plus hautes altitudes pour compenser la hausse des températures. Le problème est qu'une grande partie de l'Afrique de l'Ouest est relativement plate, et qu'il ne s'y trouve pas de terres «plus hautes», confiait-il en septembre 2011. Le changement climatique pourrait donc entraîner une réduction drastique des terres propices à la culture du cacao.

La pauvreté exacerbe les difficultés rencontrées par la filière. En Côte d'Ivoire et au Ghana, les mouvements internes de populations de diverses origines ethniques et l'immigration du Burkina Faso, pays voisin plus pauvre, ont non seulement créé des

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

X. Argout et al., *The genome of Theobroma cacao*, *Nature Genetics*, vol. 43, pp. 101-108, 2011.

L. Grivetti et H.-Y. Shapiro (éds.), *Chocolate: History, Culture and Heritage*, Wiley, 2009.

M. Barel, *Du cacao au chocolat*, Quæ, 2009.

## ✓ SUR LE WEB

Base de données sur le génome du cacao: [www.cacaogenomedb.org](http://www.cacaogenomedb.org)

Conférence d'Harold Schmitz sur l'avenir du chocolat: [www.youtube.com/watch?v=2bJw5L1tCic](http://www.youtube.com/watch?v=2bJw5L1tCic)

Résumé de l'histoire du chocolat: [www.ScientificAmerican.com/feb2012/chocolate](http://www.ScientificAmerican.com/feb2012/chocolate)

Site de Mars sur le cacao: [www.mars.com/cocoasustainability/home.aspx](http://www.mars.com/cocoasustainability/home.aspx)

tensions dues à la disparité des richesses, mais aussi compliqué l'attribution des terres. Dans les deux pays, les agriculteurs hésitent à investir et nombre d'entre eux ne souhaitent plus cultiver le cacaoyer tant que la productivité ne sera pas notablement améliorée. Les jeunes quittent les exploitations, de sorte que l'âge moyen des cultivateurs augmente tandis que leur niveau d'instruction diminue. Les engrais, les fongicides et les pesticides, qui pourraient notablement accroître le rendement des cultures, sont peu, voire pas du tout, employés dans la région, car les fermiers n'ont pas les moyens de les acheter et ignorent comment les utiliser efficacement. Et même s'ils pouvaient les acheter, on peinerait à les leur fournir, car les exploitations sont souvent isolées et accessibles uniquement par de routes mal entretenues.



## Rendements au tiers de leur potentiel

Face à toutes ces difficultés, on cherche à accroître la production sans détruire des forêts tropicales pour les transformer en terres arables. Les terres abandonnées doivent être réhabilitées en enrichissant le sol par des engrais et en plantant des arbres et des arbustes pour juguler l'érosion. Le rendement mondial moyen est d'environ 450 kilogrammes de fèves de cacao par hectare, tandis que les cultures exploitant des techniques agricoles modernes peuvent produire 1500 kilogrammes ou plus par hectare.

On peut aussi augmenter les rendements par amélioration génétique. Dans ce domaine, le cacaoyer n'a pas reçu la même attention que des cultures telles que le riz, le maïs ou le blé, dont le rendement s'est accru de façon spectaculaire.

Cependant, nous avons franchi un grand pas il y a environ deux ans : des chercheurs du groupe agroalimentaire Mars, du Service de recherche agricole (ARS) du ministère américain de l'Agriculture, d'IBM et d'autres organismes ont réalisé le séquençage et l'analyse du génome de la variété nommée Matina 1-6, qui représente une part importante des cacaoyers cultivés dans le monde – au moins 96 pour cent selon certains experts, mais ce chiffre reste à confirmer. Les résultats ont été mis en ligne sur le site de Mars. En parallèle, un autre consortium, mené par le Centre de recherche agromomique français CIRAD, a séquencé une variété différente de cacaoyer et publié la séquence complète ([voir l'encadré page 68](#)).

**2. LES CULTURES MIXTES** combinent par exemple le cacao et la noix de coco, comme ici au Brésil. Elles assurent un revenu et de la nourriture aux fermiers tout au long de l'année. En outre, elles ont une meilleure capacité de rétention d'eau, grâce aux structures variées des racines.



Pour être efficaces, les recherches moléculaires pratiquées dans les laboratoires des pays développés doivent s'inspirer d'études menées sur le terrain. Au cours des dix dernières années, Mars et l'ARS ont mis en place des réseaux de sélectionneurs de cacao en Afrique de l'Ouest, en Asie du Sud-Est et en Amérique latine. Les sélectionneurs identifient, dans les cultures de cacaoyers à travers le monde, des caractéristiques telles que la résistance aux maladies, un rendement supérieur, l'exploitation efficace de l'eau et des nutriments, et l'adaptabilité aux variations climatiques (notamment les résistances à la chaleur et au manque d'eau). Wilbert Phillips-Mora, un sélectionneur du Costa Rica, a ainsi trouvé une variété résistante à la moniliose. Il a envoyé des échantillons aux biologistes moléculaires, qui ont utilisé la carte du génome pour identifier un marqueur génétique de cette résistance : ce marqueur est une zone du génome incluant le gène impliqué, mais le dernier n'est pas encore précisément identifié.

Les marqueurs génétiques autorisent des sélections rapides : lorsqu'on crée une nouvelle variété (par exemple en mélangeant les pollens), on détermine si elle a le caractère souhaité (telle la résistance à une maladie) en recherchant les marqueurs associés dans le génome ; on évite ainsi d'attendre plusieurs années, le temps que la

**3. LES CROISSANCES MIXTES** par le champignon de la pourriture brune se couvrent peu à peu de taches noires et deviennent impropres à la consommation.

plante se développe. On parle de sélection assistée par marqueurs moléculaires.

Les sélectionneurs ont aussi identifié des variétés résistant au balai de sorcière, mais elles produisent souvent un cacao de mauvaise qualité et elles sont vulnérables à d'autres maladies. De même, des chercheurs ont découvert un type de cacao résistant au VSD (*Vascular-streak dieback*, ou maladie des stries vasculaires), une maladie causée par le champignon *Oreobacterium theobroma*, qui sévit en Asie du Sud-Est; ils analysent actuellement les fondements génétiques de ce caractère.

En croisant des plantes soigneusement sélectionnées, on espère créer de nouvelles variétés combinant résistance et qualité. En revanche, les organismes génétiquement modifiés (OGM) sont peu développés car les transgénèses (l'insertion d'un ou plusieurs gènes dans un organisme vivant) sont difficiles sur le cacaoyer. Dans ce domaine, seuls quelques résultats de laboratoire ont été obtenus, notamment à l'université de Pennsylvanie, sur des types de cacaoyers peu cultivés; en l'absence de culture d'OGM de cacaoyer, les producteurs de cacao devront

Orchestrer aussi à produire des arbres plus petits. Pendant la récolte, les cultivateurs détachent les cabosses de l'arbre à l'aide de couteaux attachés au bout de longues perches. C'est une opération délicate, car il ne faut pas endommager le site de croissance de la cabosse. Un arbre moins haut, mais aussi productif, voire plus, consommerait moins de ressources par cabosse et faciliterait la récolte.

Même des arbres de petite taille et résistants à la sécheresse ont besoin d'eau. Quelle que soit l'efficacité des nouvelles variétés, les producteurs de cacao devront

## COMMENT RÉPONDRE AUX MENACES ?

Les cacaoyers poussent que dans une bande de territoire limitée à des latitudes comprises entre 18 degrés Nord et 18 degrés Sud. Les cultures de cacao sont mises à rude

épreuve partout sous les Tropiques, mais les menaces varient d'une région à l'autre. Voici un aperçu des principaux problèmes et des solutions envisagées.

### Les menaces

**La moniliose**, une maladie fongique qui attaque les cabosses de cacao, s'est étendue en Amérique latine et pourrait faire son apparition au Brésil.

**L'irrégularité des pluies** au Brésil pourrait s'accroître avec le changement climatique, ce qui soumettrait les cultures de cacao à des sécheresses désastreuses.

**La grande pauvreté** qui sévit au Ghana et dans d'autres pays d'Afrique de l'Ouest empêche les cultivateurs d'acheter les engrais fongicides et pesticides qui permettraient d'accroître le rendement des cultures. En outre, les cultivateurs ne disposent pas des compétences nécessaires pour les employer efficacement.

**Le foreur des cabosses** de cacao, un insecte dont les larves pénètrent dans les cabosses et se nourrissent de la pulpe des fèves, entraîne des pertes de plusieurs centaines de millions d'euros dans l'Est de l'Asie.



Production de cacao en 2009 (en tonnes par an)

1 000 100 000 200 000 1 000 000

### Les solutions

**Cultiver des arbres plus résistants.** Grâce notamment au séquençage du génome du cacaoyer, les chercheurs ont identifié une variante génétique qui confère une certaine résistance à la moniliose. Les producteurs greffent des branches de cultivars résistants sur leurs arbres.

**Mettre au point des systèmes d'agroforesterie.** Planter des cacaoyers parmi des cultures vivrières, des arbres fruitiers et des arbres de haute futaie améliore la rétention d'eau dans le système en quadrillant le sol par des structures de racines variées.

**Former les cultivateurs.** Un programme lancé par la Fondation mondiale du cacao vise à former les cultivateurs, à promouvoir la diversification des cultures et à améliorer l'efficacité de la chaîne logistique.

**Développer la lutte intégrée contre les nuisibles.** Certains cultivateurs ne recourent plus seulement aux pesticides, qui peuvent nuire à la biodiversité, à l'environnement et à la santé, mais utilisent par exemple des prédateurs naturels du foreur de cabosses pour le combattre.

Source : United Nations Food and Agriculture Organization

développer l'irrigation plutôt que de compter sur des pluies peu fiables. Les approches varient selon les régions. Le Brésil a adopté deux stratégies très différentes. La première s'appuie sur les petits cultivateurs, qui sont formés à l'application de systèmes d'agroforesterie mixte, où les cacaoyers sont plantés parmi d'autres types d'arbres et de cultures. Ces mélanges améliorent la capacité de rétention d'eau du système, en créant une matrice de racines variées.

La seconde stratégie, appliquée dans la région de Bahia, consiste à mettre en place de vastes plantations de cacaoyers, à une altitude supérieure à celle des plantations traditionnelles, afin de sortir du rayon d'action des maladies et des ravageurs usuels; les arbres sont situés en plein soleil et irrigués avec de l'eau enrichie en engrais pour obtenir une productivité maximale. Au Vietnam, les cultivateurs – parfois confrontés à une pénurie d'eau suite à un pompage immodéré dans les nappes phréatiques – construisent des réservoirs pour collecter l'eau de pluie et irriguer les cacaoyers.

## Des formations enrichissantes

Dans la lutte contre les dangers qui menacent le cacao, la question de la formation est capitale. Au début de 2009, la fondation mondiale du cacao (*World Cocoa Foundation*, ou WCF) a lancé un programme de 40 millions de dollars, financé par la fondation Bill & Melinda Gates et par 16 entreprises; environ 200 000 cultivateurs de cacaoyers, dans cinq pays d'Afrique centrale et occidentale, en bénéficient. Ce programme en cinq ans, nommé *Cocoa Livelihoods Program* (programme de subsistance par le cacao), vise à améliorer les connaissances et la compétitivité des cultivateurs, à accroître la productivité et la qualité, à promouvoir la diversification des cultures et à augmenter l'efficacité de la chaîne logistique.

Le programme est fondé sur une série d'écoles d'agriculture de terrain, inspirées de celles mises en place par l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) des Nations unies; dans ces dernières, implantées notamment en Afrique et en Asie, les agriculteurs se réunissent autour d'un animateur. Dans le programme du WCF, des dirigeants locaux ont servi de relais pour dispenser la majorité des formations. Outre les questions agricoles de base, concernant par exemple les maladies qui

## Trouver les gènes de résistance

Les maladies fongiques causent la perte de 30 pour cent des récoltes de cacao à l'échelle mondiale. Pour y remédier, on cherche à identifier des gènes de résistance à ces maladies. Le consortium international ICGS (*International Cocoa Genome Sequencing Consortium*), coordonné par une équipe française du CIRAD, a alors séquencé le génome d'un cacaoyer nommé *Criollo*, collecté au Belize et à l'origine d'un des chocolats les plus fins.

Quelques 28 798 gènes codant des protéines ont été mis en évidence. Près de 550 d'entre eux sont des gènes de résistance connus dans le monde végétal: ils codent par exemple des substances toxiques pour des champignons pathogènes ou des insectes ravageurs. Chez le cacaoyer, certains de ces gènes, qu'on a identifiés, sont impliqués dans des mécanismes de résistance aux maladies du balai de sorcière et de la pourriture

brune des cabosses. Des études complémentaires tenteront bientôt d'y confirmer.

Ces travaux vont accélérer l'élaboration de variétés de cacaoyers résistantes. Ce n'est pas leur seul intérêt: des gènes qui codent des protéines intervenant dans les arômes ont aussi été identifiés. Le séquençage du génome renseigne également sur l'histoire évolutive des cacaoyers.

**Xavier Argout,**  
CIRAD, Montpellier.

touchent les cultures ou la façon de récolter, les écoles abordent des thèmes comme le paludisme, le sida, la sécurité dans les exploitations et le travail des enfants. Selon le président de la WCF, Bill Guyton, les diplômés de ces écoles augmentent leurs revenus de 23 à 55 pour cent.

En Asie du Sud-Est, les cultivateurs sont généralement mieux formés qu'en Afrique. Dans cette région, le principal défi n'est pas la diffusion des compétences, mais la mise en place d'une lutte dite intégrée contre le foreur de cabosses; une telle lutte combine divers types de techniques (biologiques, chimiques...) tout en respectant l'environnement. Parmi ces techniques, citons l'usage de pièges à phéromones (on attire les insectes grâce à des phéromones sexuelles) et l'introduction de fourmis noires (des prédateurs naturels du foreur de cabosses). Ces deux techniques visent à remplacer les pesticides, qui risquent de nuire à la biodiversité de la région.

Il est possible de tripler durablement le rendement des cultures de cacao. Des engrais, des fongicides et des programmes de formation efficaces existent déjà, et les scientifiques sont en train d'élaborer des variétés résistantes aux insectes et aux maladies. Toutefois, leur transmission à des cultivateurs pauvres et isolés est une tâche bien trop lourde pour un gouvernement, une agence des Nations unies, une entreprise ou une organisation agissant en solitaire. Des coalitions innovantes et dynamiques sont donc nécessaires. Faire du cacao une culture réellement durable constitue un énorme défi, mais nous avons

bon espoir d'assurer l'avenir du chocolat et du vaste écosystème social, culturel et écologique qu'il sous-tend.

## Le chocolat en chiffres

- ✓ Entre 40 et 50 millions de personnes travaillent dans la filière du chocolat.
- ✓ Plus de 68 milliards d'euros: c'est le chiffre des ventes annuelles de chocolat.
- ✓ 3,7 millions de tonnes de cacao sont produites aujourd'hui, tandis que la demande mondiale devrait être de 10 millions de tonnes en 2020.
- ✓ 70 pour cent du cacao mondial est produit par quatre pays d'Afrique: la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Nigeria et le Cameroun.
- ✓ 80 pour cent des récoltes ont été détruites par la maladie du balai de sorcière dans la région de Bahia, au Brésil.
- ✓ Plus de 450 millions d'euros de pertes ont pu être évitées grâce à l'insecte ravageur *Conopomorpha cramerella* en Asie du Sud-Est.



# Des polymères pour les panneaux solaires

Uwe Hahn  
et François Cardinali

**Pour améliorer la performance et réduire le coût des panneaux photovoltaïques, une solution consisterait à remplacer le silicium par des polymères.**

**C**omment faire des économies d'énergie ? Comment diversifier cette production et réduire les coûts ? Les questions soulevées par la production et la gestion de l'énergie sont nombreuses. Et c'est sans parler des conséquences géopolitiques et écologiques de l'utilisation du charbon, du pétrole et de l'uranium. Face à ces difficultés, l'énergie solaire semble une ressource inépuisable et propre. Cette technologie n'est pas récente : en 1958, le satellite américain Vanguard 1 fut équipé de petites cellules solaires qui lui ont permis

d'atteindre une longévité exceptionnelle de sept ans. Les satellites précédents puisaient leur énergie dans une batterie qui leur donnait une autonomie de quelques mois. Après le succès de *Vanguard 1*, les panneaux solaires en silicium sont devenus le dispositif privilégié pour alimenter les satellites et la Station spatiale internationale dont les panneaux solaires couvrent une surface de 2 500 mètres carrés.

L'énergie solaire n'est maintenant plus limitée au domaine spatial : les panneaux solaires ont envahi les toits des maisons

et des lieux publics. Toutefois, il reste deux obstacles de taille pour que cette source d'électricité s'impose : les coûts élevés de fabrication des dispositifs et leur faible rendement. C'est pourquoi, parmi toutes les recherches en cours, nous nous intéresserons à une nouvelle génération de cellules solaires à base de polymères.

Aujourd'hui, presque tous les panneaux solaires sont fabriqués à partir de silicium. Ils ont un rendement théorique de l'ordre de 25 pour cent, c'est-à-dire qu'un quart de l'énergie lumineuse qui éclaire la surface d'un panneau est converti en électricité. Les panneaux solaires du commerce ont un rendement d'environ 17 pour cent. Ces panneaux ont une durée de vie supérieure à 20 ans, sont fiables et ne nécessitent presque aucun entretien. **Deborah,**



## L'ESSENTIEL

✓ L'énergie solaire offre des perspectives intéressantes pour produire de l'électricité.

✓ Les panneaux solaires au silicium dominent le marché grâce à de bons rendements, mais ils sont chers à fabriquer.

✓ Les polymères conjugués qui se comportent comme des semi-conducteurs, offrent une alternative prometteuse.

✓ Les panneaux solaires à base de polymères sont bon marché et leurs performances sont en progrès constant depuis 20 ans.

certaines matériaux, un électron peut être arraché d'un atome en absorbant un photon de lumière. De tels électrons forment un courant lorsque le matériau est placé entre deux électrodes. Plus précisément, dans un solide, les électrons occupent certaines gammes d'énergies nommées bandes. La dernière bande complètement remplie est la bande de valence. Dans le cas des semi-conducteurs, la bande suivante, dite de conduction, est vide mais proche ; un faible apport d'énergie – sous forme de photon par exemple – est suffisant pour faire passer des électrons dans cette bande et à créer un courant (voir l'encadré page 66).

## Le silicium, un matériau efficace

Dans un panneau solaire à base de silicium, un électron qui absorbe un photon passe ainsi dans la bande de conduction et laisse un « trou » chargé positivement à sa place dans la bande de valence. On cherche à attirer les charges négatives vers une électrode et les positives vers l'autre afin de créer un courant. On améliore cette séparation des électrons et des trous en dopant le matériau, c'est-à-dire en ajoutant des atomes au silicium pour l'enrichir ou l'appauvrir en électrons.

Une couche dopée N (pour dopage négatif) est obtenue en incorporant des atomes de phosphore ou d'arsenic, riches en électrons. Une couche dopée P (pour dopage positif) est appauvrie en électrons par l'ajout d'atomes de bore. L'association d'un élément de silicium dopé P et d'un autre dopé N crée une tension à la jonction qui sépare les électrons des trous. Un tel dopage renforce la capacité d'un semi-conducteur à produire de l'électricité.

Un semi-conducteur au silicium est efficace pour produire un courant, le plus compliqué étant la production du silicium lui-même. Cet élément – le plus abondant à la surface de la Terre après l'oxygène – n'existe pas à l'état libre, mais essentiellement sous forme de silice – quartz et sable – ou de silicates. Par conséquent, il convient de réduire la silice pour produire le silicium. Dans les cellules photovoltaïques, le silicium doit être d'une extrême pureté (99,9999 pour cent). De telles contraintes ont un coût énergétique : il faut l'équivalent de dix à cinq ans de production d'électricité pour compenser l'énergie nécessaire à la fabrication d'un panneau solaire ! Les polymères ont un coût de

l'exploitation de l'énergie solaire est modulable : au lieu d'une centrale unique qui alimente une région, chaque habitation ou infrastructure peut être équipée de panneaux solaires en fonction de ses besoins. Ce choix énergétique s'accompagne de la mise au point d'un réseau « intelligent » de distribution de l'électricité : en cas de production insuffisante, due à un manque de soleil, l'électricité est acheminée d'un autre site de production.

En revanche, ces différents aspects positifs sont contrebalancés par le coût élevé de la fabrication des panneaux solaires à base de silicium. Et, absurdité des marchés, ces derniers sont, en grande partie, fabriqués en Chine où l'électricité est produite par des centrales à charbon, particulièrement polluantes.

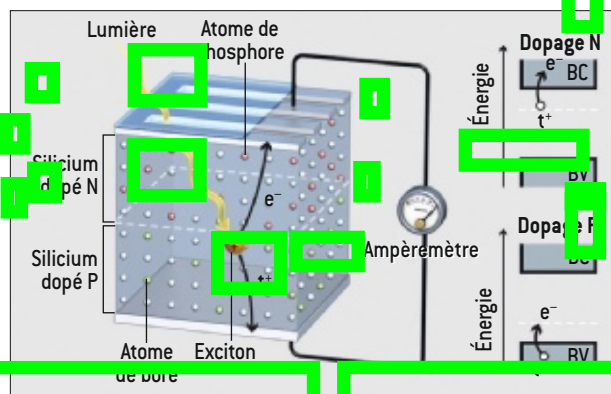
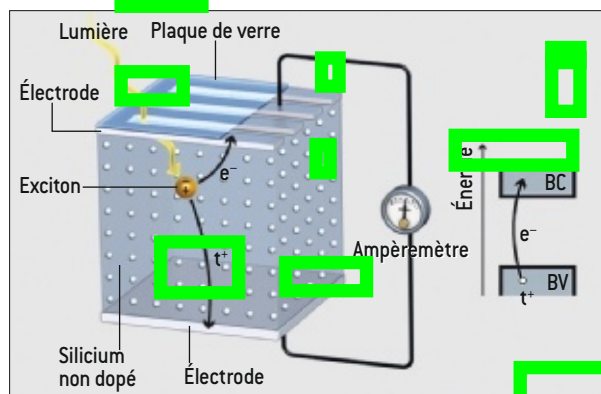
D'autres matériaux pourraient-ils réduire le coût des panneaux solaires ? Depuis une vingtaine d'années, on explore la possibilité de remplacer le silicium par des polymères. Les panneaux solaires à base de polymères sont bon marché et leur flexibilité les rend faciles à installer sur de nombreux supports. Comment peut-on passer des semi-conducteurs à base de silicium aux polymères, comment les polymères peuvent-ils conduire l'électricité et comment les chimistes et les ingénieurs améliorent-ils les rendements des panneaux qu'ils produisent ?

Les premières cellules photovoltaïques à base de silicium ont été construites par les Laboratoires Bell dans les années 1950. Elles reposent sur l'effet photoélectrique, expliqué par Albert Einstein en 1905 : dans

## THÉORIE DES BANDES DANS LE SILICIUM

Dans le silicium, l'énergie des électrons ( $e^-$ ) ne peut prendre que des valeurs comprises dans certaines gammes nommées bandes. Les électrons remplissent d'abord les niveaux de basse énergie. La dernière bande remplie est celle de valence (BV); ses électrons participent aux liaisons entre les atomes. La bande autorisée suivante – la bande de conduction (BC) – est séparée de la bande de valence par une bande interdite ou bande interdite. Un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction grâce à l'agitation thermique ou l'absorption d'un photon. L'électron devient mobile dans le silicium. Ce type de matériau est dit semi-conduc-

teur. Si l'agitation est trop importante, il n'y a pas de courant, le matériau est isolant. Lorsqu'un électron passe dans la bande de conduction, il laisse un trou chargé positivement ( $t^+$ ) dans la bande de valence. L'électron et le trou forment un état lié nommé exciton. Il faut séparer les charges pour créer un courant. Le silicium est dopé en ajoutant des atomes de phosphore riches en électrons (dopage N) ou des atomes de bore pauvres en électrons (dopage P). La jonction de silicium dopé N et dopé P au sein d'une cellule photovoltaïque facilite la formation d'excitons à leur interface et la séparation des charges et donne un meilleur rendement.



fabrication nettement inférieure au silicium : dans quelle mesure peuvent-ils remplacer les semi-conducteurs au silicium ?

Les polymères organiques sont composés de macromolécules constituées de chaînes d'atomes de carbone. Ils sont utilisés dans des matériaux plastiques... isolants. Dès lors, pourquoi envisager qu'ils puissent remplacer le silicium ? En 1977, Alan Heeger et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie ont découvert les propriétés conductrices de certains polymères.

qu'ils se déplacent en permanence. A. Heeger s'est intéressé aux polymères conjugués qui alternent des liaisons simples et des liaisons doubles le long de la chaîne carbonée. Dès lors, les électrons  $\pi$  sont délocalisés tout le long de la molécule.

Ainsi les polymères peuvent être décrits par un modèle de bandes analogue à celui des semi-conducteurs au silicium, la bande de valence étant l'équivalent de la bande de conduction. A. Heeger a montré que le polyacétylène se comporte comme un semi-conducteur lorsqu'il est mis en présence d'un oxydant, qui retire des électrons de la bande  $\pi$  ou d'un réducteur, qui en ajoute. A. Heeger, Alan MacDiarmid et Hideki Shirakawa ont obtenu le prix Nobel de chimie en 2000 pour leurs travaux sur les polymères conducteurs.

Dans les années 1990, chimistes et ingénieurs se sont intéressés à l'utilisation des polymères conjugués pour créer une nouvelle génération de panneaux solaires bon marché et flexibles. En effet, l'énergie nécessaire pour faire passer un électron dans la bande de conduction est comparable à l'énergie fournie par la lumière visible. L'absorption de photons par ces polymères crée un exciton (une paire électron-trou) qui est mobile le long d'une molécule. Mais comment parvient-il jusqu'aux électrodes pour produire un courant électrique ?

## Des électrons peu mobiles

Dans les polymères dits saturés, chaque atome de carbone, contenant quatre électrons de valence, est lié à quatre atomes différents par des liaisons covalentes simples. Quand plusieurs électrons d'un atome sont engagés dans une liaison avec un autre atome de carbone, la molécule est dite insaturée. Lorsque deux atomes sont liés, leurs orbitales atomiques, qui définissent les régions de l'espace autour de l'atome où la probabilité de trouver les électrons est élevée, se mêlent : on dit qu'elles sont hybridées. Dans le cas d'une liaison double, on a notamment un recouvrement d'orbitales créant une liaison notée  $\pi$ , fragile et mobile, car les électrons impli-

### LES AUTEURS



Uwe HAHN est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire de chimie des matériaux moléculaires de l'Université de Strasbourg.

François CARDINALI est directeur de laboratoire au sein de la division Matériaux de la Société Chimique de France.

Dans le réseau cristallin du silicium, les électrons de la bande de conduction sont très mobiles tout le long du cristal et peuvent aisément rejoindre les électrodes. Dans un polymère, l'exciton doit passer d'une molécule à une autre, ce qui est difficile, car celles-ci interagissent peu. Le transfert se fait par « sauts ». Ainsi, la mobilité des excitons est plus faible dans les polymères que dans le silicium. Or ce facteur est crucial pour le rendement des cellules solaires : plus les excitons se déplacent lentement, plus grande est la probabilité que l'électron soit piégé dans la molécule.

Comment améliorer la mobilité de l'exciton et faciliter la dissociation de l'électron et du trou pour augmenter le rendement ? Une des solutions envisagées consiste à fabriquer des cellules avec deux types de polymères. L'un étant accepteur d'électrons – avec une grande affinité électronique – et l'autre donneur d'électrons.

Deux électrodes planes sont disposées de part et d'autre d'une feuille de polymère conducteur et une tension est appliquée pour faciliter le mouvement des excitons. Quand des excitons se trouvent près d'une interface séparant les deux types de polymères, l'accepteur attire l'électron de l'exciton, lequel est transmis jusqu'à l'électrode, tandis que le donneur d'électrons récupère le trou, transféré jusqu'à l'autre électrode. Il y a séparation des charges. Quand les deux

charges parviennent aux électrodes, un courant circule dans le circuit.

Comment disposer l'accepteur par rapport au donneur dans une cellule solaire ? Les premières structures de cellules solaires à polymères étaient constituées d'une couche contenant l'accepteur posée sur une autre contenant le donneur, le tout placé entre deux électrodes – on parle de jonction hétérogène plane. Dans un tel dispositif la séparation des charges n'est efficace qu'à proximité de l'interface (quand l'exciton est situé à moins de 20 nanomètres, ce qui est de l'ordre de la distance de diffusion des excitons).

Toutefois, afin d'absorber une quantité suffisante de lumière incidente, le film doit avoir, pour la plupart des semi-conducteurs organiques, une épaisseur supérieure à 100 nanomètres. On voit donc qu'il faut trouver un compromis : la couche doit être suffisamment épaisse pour absorber un maximum de lumière, mais assez mince pour permettre aux excitons d'atteindre l'interface et de se dissocier. Une architecture à deux couches planes conduit généralement à des dispositifs peu efficaces en termes de conversion de lumière en courant. Les premiers exemples de telles cellules solaires polymères bicouches datent de 1992 : leur efficacité de 0,04 pour cent

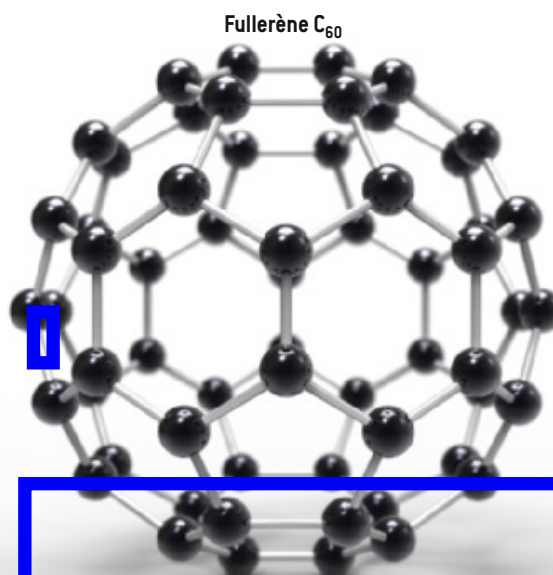
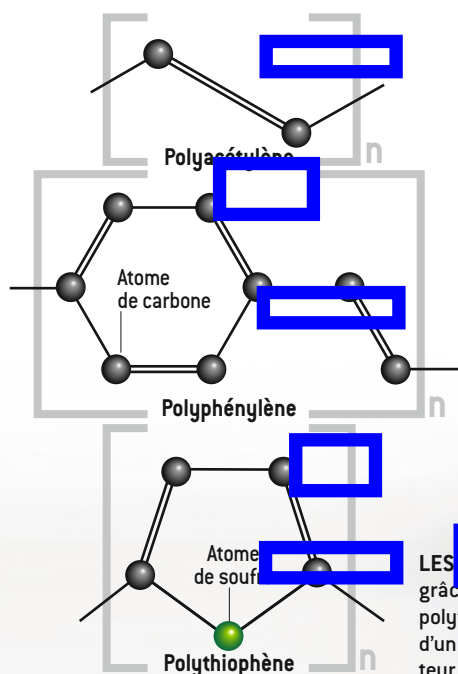
était faible, mais on avait prouvé que les cellules solaires à polymères fonctionnent.

En 1995, A. Heeger proposa de fabriquer des réseaux interpénétrés de matériaux donneurs et accepteurs d'électrons pour augmenter les interfaces où la dissociation des excitons est possible. Dans ce procédé, nommé interface massivement hétérogène, un exciton est toujours produit près d'une limite entre un domaine accepteur et une zone donneuse d'électrons. Dans cette configuration, il est possible d'utiliser une cellule relativement épaisse, permettant une conversion de la lumière en courant électrique plus importante. Les cellules à interface massivement hétérogène ont atteint des

rendements de l'ordre de 2,5 pour cent, dès le milieu des années 1990, avec des matériaux utilisés auparavant en bicouches.

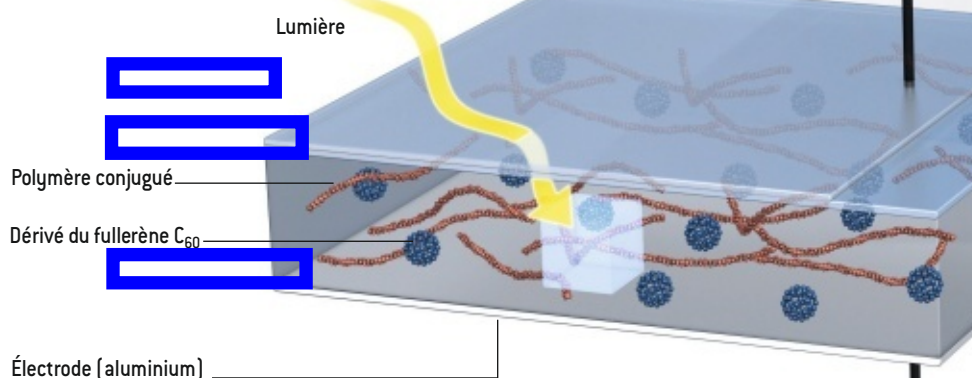
Ce rendement faible comparé à celui des semi-conducteurs au silicium est compensé par des méthodes de fabrication peu onéreuses et pratiques à mettre en œuvre. Pour fabriquer ces films de matériaux organiques, la méthode la plus simple est de laisser tomber une goutte de solution – contenant le solvant, le donneur et l'accepteur – sur un support et de la faire sécher. Cette méthode forme des films homogènes, mais dont l'épaisseur est aléatoire, ce qui ne permet pas d'avoir une bonne connexion avec les électrodes et diminue le rendement. Une variante consiste à déposer un liquide sur un support en rotation, tournant à une

## Augmenter les interfaces



LES POLYMERES CONJUGUES, tel le polyacétylène, ont des propriétés semi-conductrices grâce à l'alternance des liaisons simples et des liaisons doubles. Le polyphénylène et le polythiophène sont utilisés dans les cellules photovoltaïques à polymères. L'association d'un dérivé du polythiophène et d'une molécule dérivée du fullerène C<sub>60</sub> – un très bon accepteur d'électrons – donne des rendements prometteurs.

La cellule solaire à base de polymères est constituée de deux électrodes et d'une couche active où la lumière est absorbée et forme des excitons. De nombreux matériaux sont testés pour obtenir les meilleurs rendements possibles. Illustrons le fonctionnement de ces cellules avec un cas concret. L'électrode positive est transparente pour laisser entrer la lumière ; elle est constituée d'un mélange d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain. Une couche de polymères conducteurs est intercalée entre la couche active et l'électrode pour améliorer les contacts. L'électrode négative est faite d'aluminium. La couche active contient un polymère conjugué donneur d'électrons (*en orange*) et un dérivé du fullerène  $C_{60}$  comme accepteur (*en bleu*). Ceux-ci sont mélangés pour augmenter les interfaces. La lumière pénètre au sein de la cellule et crée un exciton sur un polymère conjugué. Près d'un dérivé du fullerène, l'exciton se dissocie : l'électron ( $e^-$ ) passe d'un fullerène à un autre par sauts successifs jusqu'à l'électrode d'aluminium. Le trou ( $h^+$ ) se déplace le long du polymère conjugué donneur d'électrons et rejoint l'électrode d'oxyde.



## BIBLIOGRAPHIE

F.C. Krebs (éd.), *Polymer Photovoltaics: A Practical Approach*, SPIE Press, 2008.

C. J. Brabec et al. (éds.), *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics and Manufacturing Technologies*, Wiley-VCH, 2008.

S.S. Sun et S. Sariciffci (éds.), *Organic Photovoltaics: Mechanisms, Materials and Devices*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.

## Des alternatives organiques

Les polymères ne sont pas les seules molécules organiques offrant des solutions pour convertir l'énergie solaire en électricité. Des dispositifs à base de petites molécules sont à l'étude. Un concept prometteur est celui des cellules inventées par Michael Grätzel à l'École polytechnique de Lausanne. Il s'agit de l'association de molécules organiques, de dioxyde de titane – qui est un semi-conducteur – et d'un électrolyte. La génération de charges s'effectue à l'interface entre le matériau organique et le dioxyde de titane, puis le transport est assuré par ce dernier et l'électrolyte. De tels dispositifs atteignent des rendements compris entre 11 et 15 pour cent. Ils sont bon marché et plusieurs équipes spécialisent déjà des cellules de Grätzel.

viensse fixée. Cette technique permet d'obtenir des films homogènes sur de grandes surfaces. Les paramètres les plus importants sont la vitesse d'évaporation du solvant, les changements de viscosité, le flux radial de la solution, ou bien la séparation de phase des mélanges.

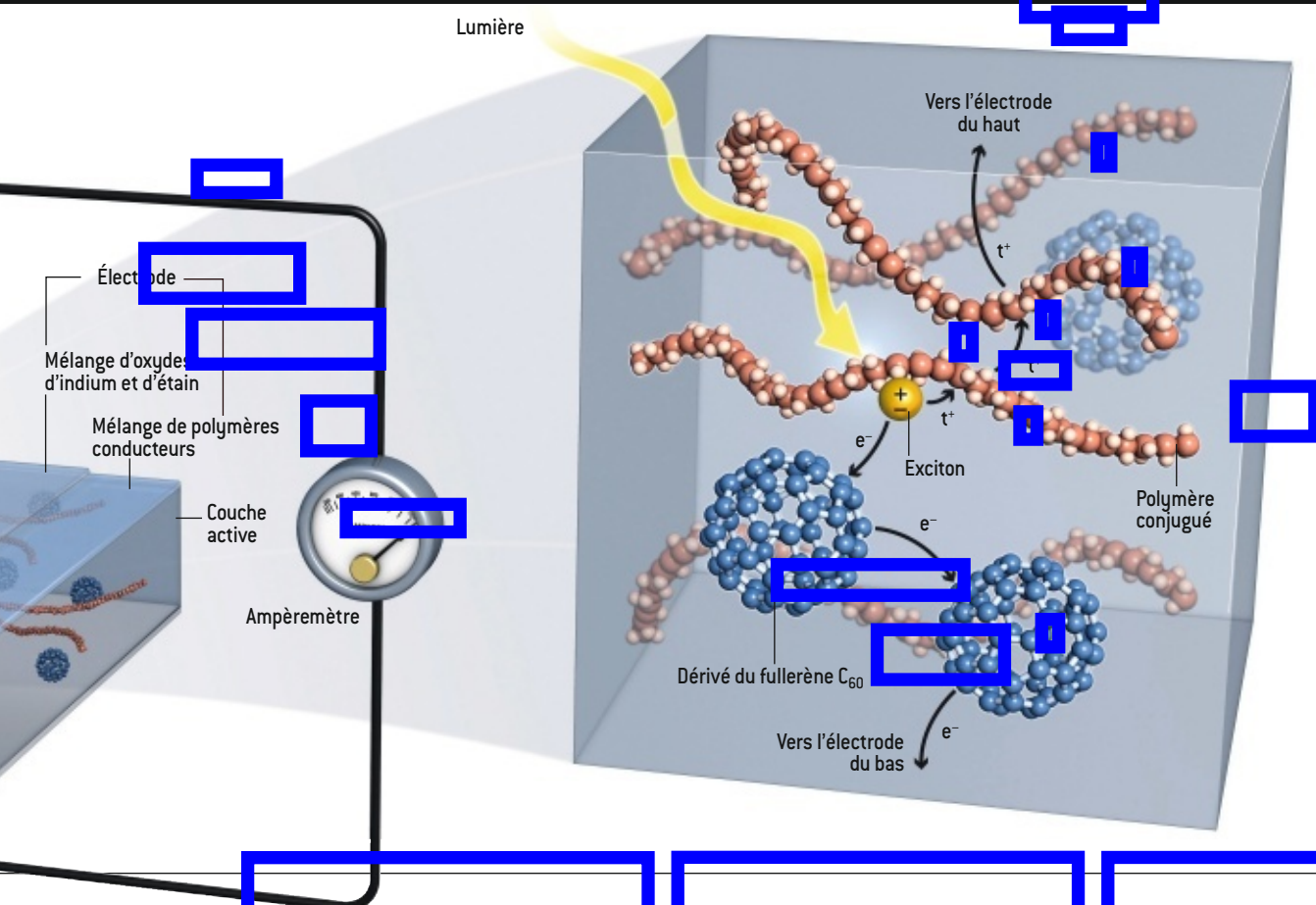
Les polymères utilisés sont souvent des colorants organiques. Ces molécules absorbent efficacement la lumière visible pour créer des excitons. Il est possible d'optimiser le rendement en choisissant les colorants en fonction de leur structure moléculaire afin d'ajuster la bande du spectre de lumière absorbée et l'énergie nécessaire pour engendrer les excitons et les séparer.

Les systèmes qui suscitent le plus d'intérêt sont ceux constitués, d'une part, d'un polymère donneur et, d'autre part, d'un fullerène jouant le rôle d'accepteur. Le fullerène le plus connu,  $C_{60}$ , contient 60 atomes de carbone disposés selon une structure sphérique semblable à un ballon de football. Les fullerènes absorbent peu la lumière visible et ont une bonne conductivité électronique. En 2005, A. Heeger et

ses collègues ont mis au point une cellule avec un dérivé de polythiophène comme donneur d'électrons et une molécule dérivée du fullerène  $C_{60}$  comme accepteur d'électrons. Ils ont obtenu un rendement dépassant cinq pour cent.

Une cellule solaire constituée de polymères est reliée par des électrodes à un circuit électrique. Les électrodes sont placées au-dessus et au-dessous de la couche de polymères, ce qui limite le parcours des charges et rend maximale la surface absorbant la lumière.

Les matériaux utilisés pour les électrodes ont également une influence sur le rendement global de la cellule. Les électrodes doivent être de bons conducteurs électriques et l'électrode positive, placée sur le dessus de la cellule, doit être transparente à la lumière visible. Elle est souvent fabriquée à partir d'un mélange d'oxydes d'indium et d'étain. La cellule fonctionne mieux lorsqu'elle est recouverte d'un mélange de polymères (un dérivé de polythiophène et un dérivé de polystyrène contenant un atome de soufre). Le mélange



E. no Bourgeois

de polymères est un conducteur, il réduit la rugosité de la surface de l'oxyde et assure un meilleur contact entre l'électrode et la couche contenant les polymères conjugués.

L'inconvénient de l'électrode d'oxydes est son prix, car l'indium est un métal rare. Des alternatives sont développées à partir d'autres oxydes. Pour gagner en flexibilité, l'électrode d'oxydes est remplacée par des nanofils de cuivre ou des polymères conducteurs. L'électrode négative est constituée d'une couche relativement épaisse de métal, comme de l'aluminium. Cette électrode est réfléchissante de façon à renvoyer la lumière qui lui parviendrait vers la couche de polymères.

En ajoutant un support flexible, tel qu'un film plastique au-dessus de l'électrode transparente, la cellule a une épaisseur inférieure au millimètre. Le film plastique, à un rôle protecteur, il empêche l'infiltration d'eau et du dioxygène de l'air au sein du dispositif. L'oxygène agit comme un accepteur d'électrons efficace qui bloque le processus de migration des électrons du courant. Cependant, il participe égale-

ment à la dégradation des polymères. Ces effets tendent à réduire l'efficacité de la cellule solaire. Les questions de dégradation des polymères et des problèmes de vieillissement de ces systèmes commencent seulement à être étudiés.

## Un rendement en augmentation

Le développement de nouveaux matériaux et de méthodes de préparation plus performantes, ainsi qu'une meilleure caractérisation de la morphologie des matériaux au sein des cellules solaires à polymères, ont permis d'améliorer les rendements de 0,8 pour cent par an depuis 2005. La Société américaine *Konarka* a atteint déjà 8,3 pour cent. Mais de nouvelles innovations pourraient accélérer ces progrès, par exemple les cellules solaires « tandem » dotées d'une structure complexe à plusieurs couches rassemblant des polymères conjugués. Chaque couche absorbe les photons dans différentes bandes du spectre. La Société

allemande *Heliatek* a atteint une efficacité de 9,8 pour cent pour des cellules solaires tandem. Et en février de cette année, la Société japonaise *Sumimoto Chemical* a établi un record à 10,6 pour cent.

Le domaine des cellules solaires à polymères progresse de façon régulière en parallèle des avancées dans le domaine des matériaux. Au-delà du rendement qui reste plus faible que le silicium, deux questions se posent : quelle est la durée de vie de ces composants et peut-on passer à une phase d'industrialisation ? Aujourd'hui, les dispositifs ont une durée de vie de l'ordre de trois à quatre ans. Christoph Babec, de l'Université d'Erlangen et Nuremberg, considère qu'une efficacité de sept pour cent et une durée de vie de sept ans seraient le seuil à franchir pour une exploitation industrielle de ces dispositifs beaucoup moins onéreux que les cellules à silicium. L'enjeu majeur est donc l'accroissement de la longévité de ces cellules à base de polymères pour s'imposer dans le domaine de la production d'électricité à partir du Soleil.

# La sélection de livres

## ■ POUR LA SCIENCE

Au programme des lectures de mai proposées par *Pour la Science*, découvrez des ouvrages de réflexion sur notre ère façonnée par les nouvelles technologies, les étonnants progrès de la logique scientifique, la recherche contre le cancer...

En partenariat  
avec les éditeurs



Tous ces livres sont  
également disponibles  
en librairie.

### Petite Poucette

Michel Serres

De l'essor des nouvelles technologies, un nouvel humain est né : « Petite Poucette » – clin d'œil à la maestria avec laquelle les messages fusent de nos pouces. « Petite Poucette » va devoir reinventer une manière de vivre ensemble, des institutions, une manière d'être et de connaître...

Éditions Le Pommier 2012

84 pages – 9,50 euros – ISBN 978-2-7465-0605-3



Nouveauté

Réf. 090605

### Nouveau regard sur le cancer

Pour une révolution des traitements

Jean-Pascal Capp

Contestant une vision purement génétique de l'origine du cancer, l'auteur souligne le rôle essentiel de l'environnement des cellules. Sa théorie débouche sur des propositions concrètes pour la recherche thérapeutique, ouvrant la voie à une révolution des traitements.

Éditions Belin/Pour la Science 2012

288 pages – 20,30 euros – ISBN 978-2-7011-5614-9



Nouveauté

Réf. 005614

### La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique – prise dans un sens large – a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Un ouvrage sur la logique moderne des sciences qui intéressera autant mathématiciens, philosophes que curieux, intrigués par le monde mathématique des nombres !

Éditions Belin/Pour la Science 2012

224 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8



Nouveauté

Réf. 075115

### Un éléphant dans ma salle d'attente

Florence Ollivet-Courtois et Sylvie Overnoy

Aider un éléphant à se relever, éduquer un chimpanzé diabétique à sa prise d'insuline... Tel est le quotidien du docteur Florence Ollivet-Courtois, vétérinaire spécialisée dans la faune sauvage, exotique et souvent « non coopérative ».

Une plongée passionnante dans les rapports entre l'humain et le sauvage.

Éditions Belin 2012

248 pages – 18 euros – ISBN 978-2-7011-6046-7



Nouveauté

Réf. 006046

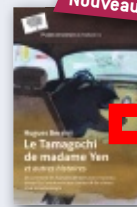
### Le Tamagochi de madame Yen et autres histoires

Hugues Bersini

Ces neuf nouvelles intrigantes, se déroulant entre Paris, Tokyo, Sao Paulo et Bruxelles, questionnent le lecteur sur des problèmes éthiques troublants : les greffes neuronales seront-elles possibles un jour ? affecteront-elles notre vécu subjectif ? Et vous, laissez-vous à un logiciel superpuissant le soin de déclencher un conflit nucléaire ?

Éditions Le Pommier 2012

320 pages – 17 euros – ISBN 978-2-7465-0599-5



Nouveauté

Réf. 090599\*



# La gravitation quantique en deux dimensions

Steven Carlip

Quelle serait l'action de la gravitation si l'espace avait deux dimensions seulement, au lieu de trois ?

L'exploration de cette idée guide les physiciens vers une théorie unifiée des forces fondamentales.

## L'ESSENTIEL

✓ Tenus en échec par l'unification de la physique quantique et de la théorie de la relativité générale, les physiciens ont étudié une version simplifiée du problème où l'univers n'a que deux dimensions.

✓ Bien que les ondes gravitationnelles ne puissent exister en deux dimensions, un tel univers peut néanmoins changer de forme globale sous l'effet de la gravitation.

✓ La théorie quantique de la gravitation qui en découle éclaire diverses énigmes des théories d'unification, telles que la façon dont le temps émerge d'un espace de fond atemporelle ou le rayonnement des trous noirs.

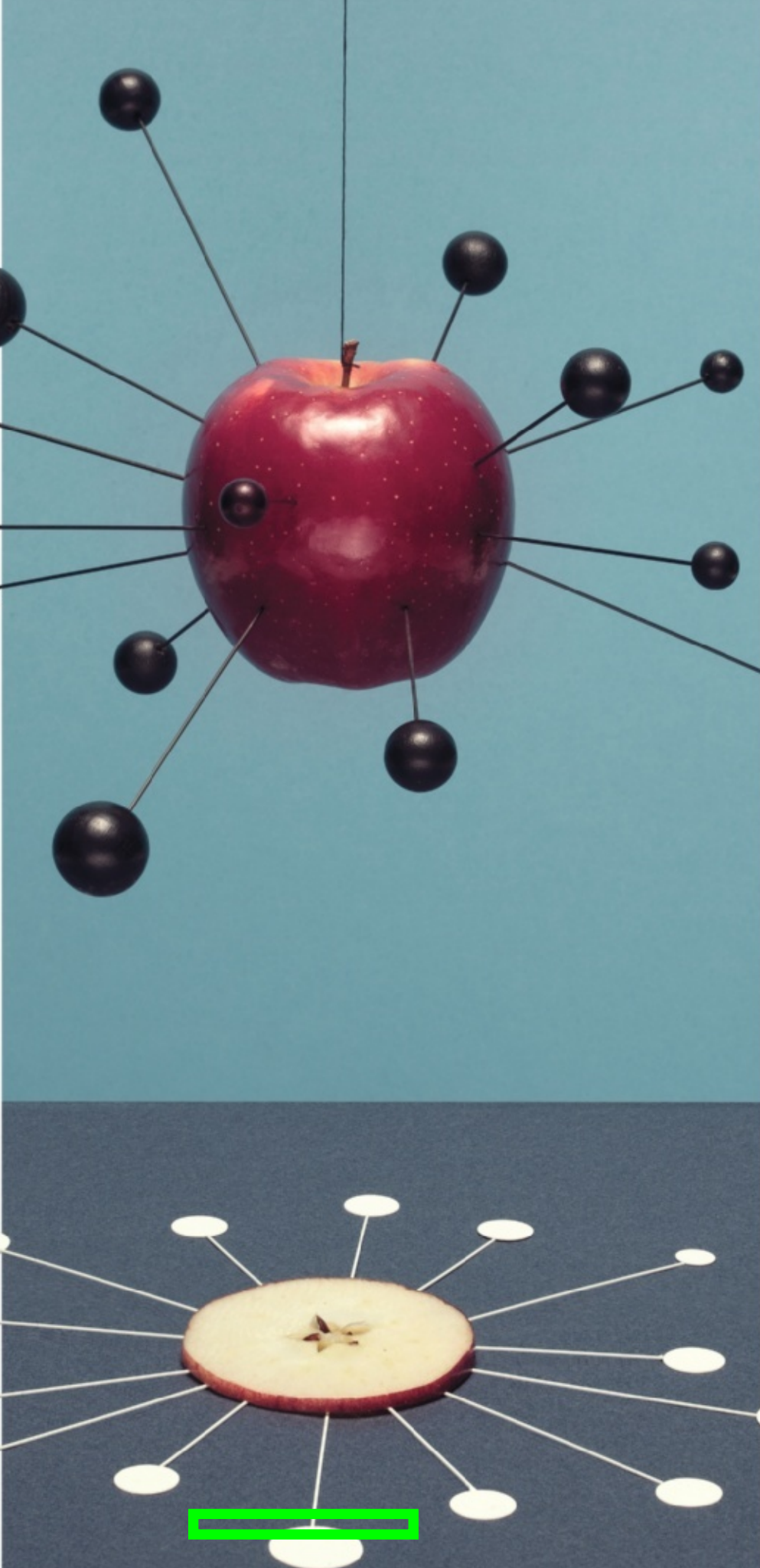
Depuis que elle existe en tant que science, la physique recherche l'unité dans la nature. Newton a ainsi montré que la force responsable de la chute d'une pomme est la même que celle qui maintient les planètes sur leur orbite. Maxwell a rassemblé les descriptions de l'électricité, du magnétisme et de la lumière en une théorie unique, l'électromagnétisme. Un siècle plus tard, les physiciens y ajoutaient l'interaction faible pour créer la théorie unifiée dite électrofaible. Einstein, quant à lui, réunissait au début du XX<sup>e</sup> siècle l'espace et le temps en un unique continuum, l'espace-temps.

Aujourd'hui, le principal chaînon manquant dans cette quête unificatrice est la réunion de la gravitation et de la physique quantique. La théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, décrit aussi bien l'évolution de l'Univers que les mouvements des planètes et la chute des pommes. La physique quantique décrit les atomes, les électrons et les quarks, les interactions fondamentales subatomiques, et bien d'autres phénomènes. Mais là où les deux théories devraient s'appliquer ensemble, dans les situations extrêmes où les effets quantiques et ceux de la gravitation sont importants, par exemple au cœur des trous noirs ou durant les premières fractions de seconde de l'Univers, elles semblent incompatibles. En dépit de tous leurs efforts

depuis plus de 80 ans pour combiner la relativité générale et la physique quantique, les physiciens n'ont pas encore réussi. La théorie de la gravitation quantique nous échappe toujours.

Posez à un physicien une question trop difficile, et il aura le réflexe professionnel de répondre : « Demandez-moi quelque chose de plus simple. » La physique progresse en étudiant des modèles simples qui capturent certains éléments d'une réalité complexe. Les chercheurs ont ainsi travaillé sur de nombreux modèles restreints de la gravitation quantique, par exemple des approximations valables lorsque la gravitation est faible, ou sur des cas particuliers tels que les trous noirs. Une autre approche consiste tout simplement à négliger une dimension de l'espace et à étudier comment la gravitation s'exerce alors. On parle d'approche 2+1 dimensionnelle, pour deux dimensions spatiales et une dimension temporelle. Les principes qui gouvernent la gravitation dans cet univers simplifié pourraient s'appliquer à notre Univers tridimensionnel et livrer de précieux indices pour l'unification.

L'idée d'oublier une dimension a déjà connu son heure de gloire. Le roman *Flatland*, publié en 1884 par Edwin Abbott, dépeint les aventures d'un carré, habitant d'un « monde plat », à deux dimensions, rempli de triangles, de carrés et autres figures géométriques. Bien que ce roman se voulût en fait une satire de la société victorienne, il a aussi déclenché une vague d'intérêt pour la géométrie dans diverses dimensions et a toujours du succès à l'heure actuelle auprès des mathématiciens et des physiciens.



Les premières études de la gravitation dans un monde à deux dimensions, dans les années 1960, furent décevantes. L'espace plan semblait être dépourvu de gravitation, car cette interaction – plus précisément les ondes gravitationnelles – n'a littéralement pas assez d'espace pour se propager. À la fin des années 1980, cependant, le sujet renaît quand les chercheurs s'aperçoivent que la gravitation fonctionne d'une façon inattendue dans un espace à deux dimensions. Certes, deux masses ne s'attirent pas selon la loi de Newton (avec une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance), mais la gravitation joue néanmoins sur la forme générale de l'espace et pourrait même y engendrer des trous noirs. Récemment, la gravitation en deux dimensions a apporté un éclairage sur certains concepts fondamentaux de la gravitation quantique, tels que le principe holographique ou la question de l'émergence du temps à partir d'un cadre atemporel.

Afin de développer une théorie quantique pour une interaction donnée, les physiciens partent en général de la théorie classique correspondante, et cherchent à la réécrire en appliquant les principes quantiques. Pour la gravitation, le point de départ est la relativité générale. C'est là que les ennuis commencent.

Selon la relativité générale, la gravitation n'est pas une force, mais une manifestation de la géométrie de l'espace-temps lui-même. La Terre tourne autour du Soleil non pas parce qu'une force s'exerce sur elle, mais parce qu'elle se déplace en suivant le chemin le plus court dans l'espace-temps, qui est courbé par la masse du Soleil. Unifier la mécanique quantique et la gravitation signifie ainsi quantifier d'une manière ou d'une autre la structure même de l'espace-temps, et pas simplement une interaction.

Pourquoi est-ce difficile ? L'une des pierres angulaires de la physique quantique est le principe d'incertitude de Heisenberg. Selon ce principe, les quantités physiques fluctuent de façon aléatoire et ne peuvent pas être fixées avec une précision infinie toutes en même temps. Dans une théorie quantique de la gravitation, l'espace et le temps eux-mêmes fluctuent, ce qui ébranle tout l'échafaudage de la physique classique. Sans un espace-temps donné sur lequel tisser la toile de fond, nous ne savons pas décrire

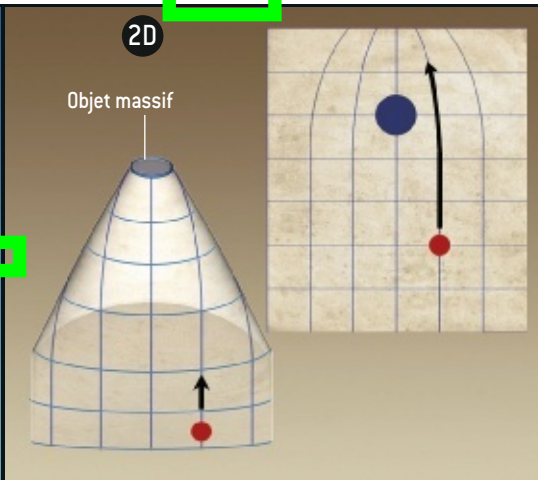
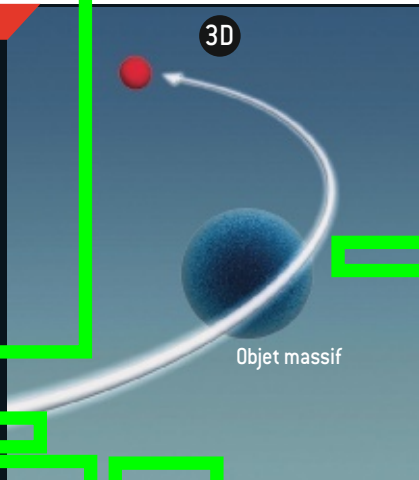
Kyle Bean

## COMMENT LA GRAVITATION FONCTIONNE EN 2D

Si l'on aplatisse un espace tridimensionnel pour le réduire à deux dimensions, les objets deviendraient plats, mais ce n'est pas tout. L'attraction, notamment, aurait un comportement complètement différent. Imaginer comment fonctionnerait la gravitation en deux dimensions est une étape utile pour élaborer une théorie quantique de la gravitation, qui réconcilierait la théorie de la relativité générale d'Einstein avec la physique quantique.

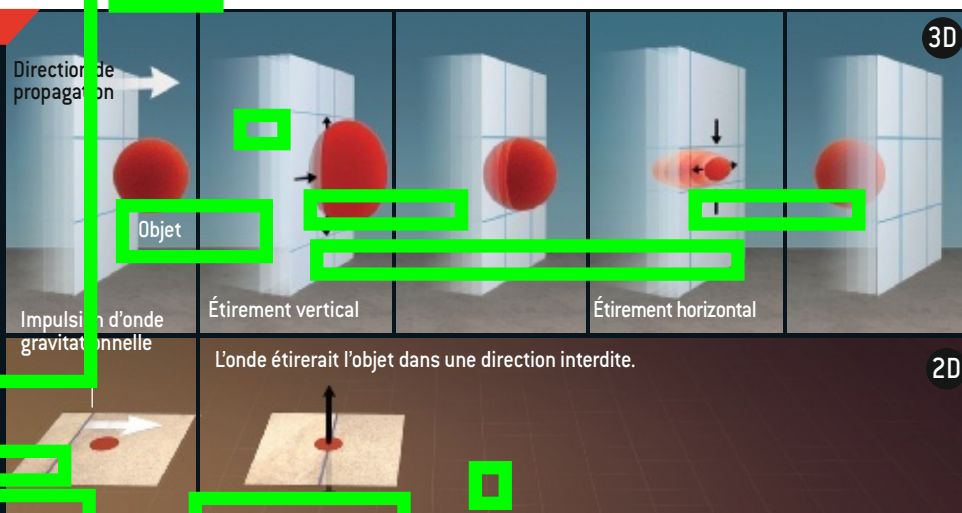
### UNE ATTRACTION DIFFÉRENTE

Un objet massif courbe l'espace. En trois dimensions, cette distorsion a pour effet que deux objets s'attirent comme le décrit la loi de l'attraction universelle de Newton. En deux dimensions, un objet massif déforme l'espace en lui imprimant une forme conique. Les trajectoires des objets sont toujours déviées, mais selon une loi qui n'est plus celle de Newton.



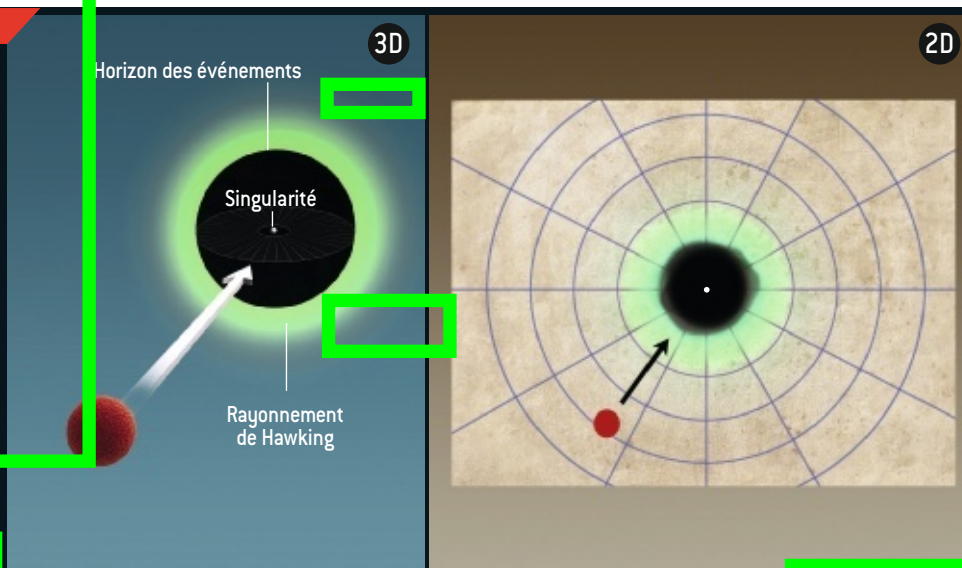
### LES ONDES IMPOSSIBLES

D'après la relativité générale, les variations du champ gravitationnel se propagent sous la forme d'ondes gravitationnelles, qui sont fondamentalement tridimensionnelles : elles étirent périodiquement les objets dans les deux directions perpendiculaires à l'axe de propagation (*en haut*). Elles ne peuvent se propager en deux dimensions (*en bas*). Or sans ondes gravitationnelles, on ne sait pas quantifier la gravitation.



### DES TROUS NOIRS EXISTENT

Les trous noirs sont des régions où les objets peuvent pénétrer, mais dont ils ne peuvent sortir en raison de l'attraction gravitationnelle intense de l'objet central. L'une des découvertes les plus surprenantes de la théorie de la gravitation en deux dimensions est que des trous noirs peuvent exister dans l'espace bidimensionnel à condition que l'espace contienne de l'énergie sombre. En raison d'effets quantiques, les trous noirs, en 2D comme en 3D, émettent un faible rayonnement thermique dit de Hawking.



Galim Gadwin

les positions, les vitesses, les accélérations et les autres grandeurs de base de la physique. En d'autres termes, nous ne savons pas donner un sens précis à l'espace-temps quantique.

Ces obstacles à la définition d'un espace-temps quantifié se manifestent de plusieurs façons. L'une d'entre elles est le célèbre « problème du temps ». Le temps est fondamental dans la réalité que nous observons. Presque toutes les théories physiques sont en fin de compte une description de la façon dont certaines grandeurs varient au cours du temps. Il importe donc de savoir précisément ce que signifie le concept de « temps ». Mais en réalité, nous ne le savons pas.

Pour Newton, le temps était absolu, hors de la nature. Les formulations habituelles de la mécanique quantique intègrent cette idée d'un temps absolu. Les théories de la relativité restreinte puis générale, en revanche, ont détrôné le temps absolu. Des observateurs en mouvement relatif ont une perception différente de l'écoulement du temps, et ne peuvent s'accorder sur la simultanéité de deux événements. Le rythme d'une horloge est plus lent dans un champ gravitationnel intense. Dans la théorie de la relativité, le temps n'est plus un simple paramètre externe, mais une composante dynamique de l'espace-temps.

Cependant, s'il n'y a pas d'horloge

de la réalité matérielle, l'écoulement apparent du temps doit émerger de la structure même de l'Univers. Mais comment ? On ne sait même pas par où commencer pour répondre à cette question.

## Pas de temps ni de coordonnées absolues

Le problème du temps a un cousin moins célèbre : le problème des observables. La physique est une science empirique. Une théorie doit faire des prédictions testables portant sur des quantités observables. En physique classique, ces quantités sont affectées à des positions spécifiques. On calcule l'intensité du champ électrique « ici » ou la probabilité de trouver un électron « là ». Les lieux sont étiquetés avec des coordonnées et les théories prédisent comment les observables dépendent des valeurs de ces coordonnées spatiales et du temps.

Or, après la théorie de la relativité, les coordonnées spatiales sont des étiquettes artificielles et arbitraires, et il n'existe pas de repère absolu. Mais si vous ne pouvez pas identifier objectivement un point dans l'espace, vous ne pouvez prétendre savoir ce qui y passe. Charles Torre, de l'Université de l'Utah, a montré qu'une théorie quantique de la gravitation ne peut pas avoir d'observables purement locales.

C'est-à-dire des observables dont les valeurs

temps. Les scientifiques en quête d'une telle théorie doivent composer avec des observables locales, dont la valeur dépend de plusieurs points en même temps (c'est notamment le cas des systèmes quantiques intriqués). De façon générale, on ne sait pas comment définir de tels objets, et encore moins les utiliser pour décrire le monde que nous observons.

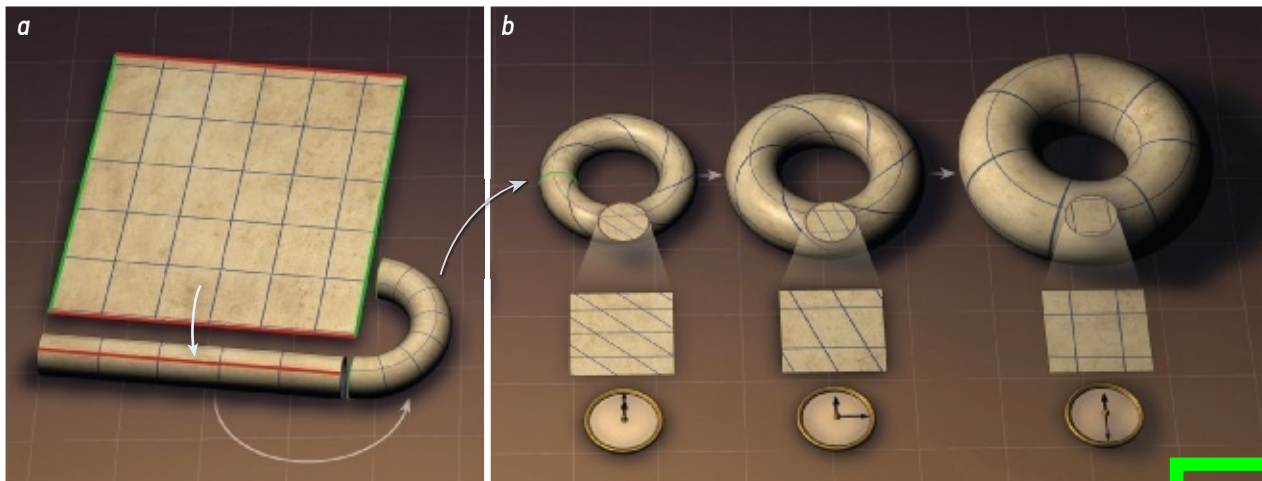
Un troisième problème est celui de la naissance de l'Univers. A-t-il surgi à partir de rien ? Décrit-il un cycle éternel de périodes d'expansion suivies d'effondrements ? Est-ce une bulle en expansion au sein d'un univers parent ? Chaque possibilité pose un problème différent pour une théorie quantique de la gravitation.

Enfin, toute une série de questions concerne les trous noirs, objets parmi les plus mystérieux. Ces astres extrêmes offrent une fenêtre sans équivalent sur la nature ultime de l'espace et du temps. Au début des années 1970, le Britannique Stephen Hawking a montré que les trous noirs ne sont pas totalement noirs. Ils doivent émettre un rayonnement similaire à celui d'un corps noir, c'est-à-dire le rayonnement de tout objet porté à une certaine température. La température reflète habituellement le comportement sous-jacent des composants microscopiques d'un système. Dire qu'une pièce est chaude, c'est dire que les molécules d'air qui la remplissent sont

## COMMENT QUANTIFIER LA GRAVITATION EN DEUX DIMENSIONS

En deux dimensions, la gravitation ne peut pas se propager. Contrairement à la situation tridimensionnelle, elle ne modifie pas la courbure de l'espace, mais modifie sa forme globale. Les physiciens ont étudié un modèle d'univers torique, obtenu par exemple en reliant les bords opposés d'un carré du plan de deux à deux (a). L'univers torique évolue au fil du temps sous

l'influence de la gravitation en des tores de tailles et de proportions différentes (b) (ces changements se traduisent par la variation d'une grandeur nommée module). Ce qui se passe dans chaque petite région de l'espace (zooms) reflète l'état global de l'espace. Dans ce modèle, le microcosme et le macrocosme sont inextricablement liés.



Malcolm Godwin



Muséum national  
d'Histoire naturelle

## Écologie acoustique



### des chiroptères d'Europe

Identification des  
espèces, études de  
leurs habitats et  
comportements  
de chasse

Michel Barataud

Animaux nocturnes, les chiroptères ont développé un système de repérage dans l'espace du type sonar. Inaudibles à l'oreille humaine, les cris des chauves-souris peuvent être perçus, enregistrés et analysés grâce à différents appareils et logiciels.

Cet ouvrage dresse le bilan des connaissances acquises par l'auteur depuis plus de vingt ans en matière de détection ultrasonore. Aux premières approches, purement auditives, il ajoute une autre dimension : l'identification par l'analyse informatique des ultrasons. Grâce aux détecteurs de plus en plus performants et à l'analyse informatique, la méthode décrite permet d'identifier en Europe environ 85 % des contacts acoustiques, de mener des inventaires et d'entreprendre des études toujours plus fines sans perturber les animaux. Ce livre traite 33 des 42 espèces de chauves-souris européennes.

#### DVD en supplément

Vous y trouverez les échantillons sonores illustrant la méthode ainsi que les fichiers (graphiques) nécessaires à l'identification des espèces.



ISBN : 978-2-85653-685-8

format 170 x 245 mm • impression quadri  
nombreuses photos • DVD • 344p. • 49,90 € TTC

ouvrage en vente dans la librairie des Publications  
Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

#### Commandes et renseignements :

Muséum national d'Histoire naturelle  
Publications scientifiques  
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05  
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40  
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

de ces composants microscopiques susceptibles de prendre différents états reste inconnue. Appelés « degrés de liberté », ils devraient être décrits dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation.

De prime abord, l'espace à deux dimensions semble peu prometteur pour chercher des réponses à ces questions. En 1963, le physicien polonais Andrzej Staruszkiewicz a déterminé une loi de la gravitation en deux dimensions en appliquant la relativité générale. Alors qu'en trois dimensions, la présence d'un objet massif courbe doucement l'espace-temps, en deux dimensions, elle tord l'espace pour former un « cône » centré sur l'objet, comme un « cornet de frites » fait d'une feuille de papier enroulée (voir l'encadré page 74). Un petit objet qui passe près du sommet du cône voit sa trajectoire défléchie, de la même façon que le Soleil courbe la trajectoire d'une comète. En 1984, le Hollandais Gerard 't Hooft et les Américains Stanley Deser et Roman Jackiw ont déterminé comment des particules quantiques (c'est-à-dire représentées par des fonctions d'onde) se déplaceraient dans un tel espace.

La déformation de l'espace bidimensionnel qu'induit la gravitation est beaucoup plus simple que le motif complexe de courbure qu'elle crée dans notre Univers tridimensionnel : la géométrie du cône reste essentiellement plane. En conséquence, il n'y a pas d'équivalent de la loi de l'attraction newtonienne. Deux corps initialement immobiles l'un à côté de l'autre ne « tombent » pas l'un vers l'autre.

### Un modèle simpliste ?

Cette simplicité est séduisante, et laisse penser que quantifier la gravitation à deux dimensions est plus facile que quantifier la relativité générale complète en trois dimensions d'espace. Malheureusement, la théorie de A. Staruszkiewicz est trop simple : elle ne possède pas assez de degrés de liberté pour être quantifiée. Un espace à deux dimensions ne laisse aucune place aux ondes gravitationnelles, un élément important de la théorie d'Einstein.

Considérons le cas plus simple de l'électromagnétisme. Les champs électriques et magnétiques sont produits par des charges et des courants électriques. Comme l'a montré James Clerk Maxwell, les variations de ces champs se propagent librement sous forme d'ondes électromagnétiques. Dans la version quantique de la théorie de Maxwell, l'énergie de ces ondes est véhiculée par des quanta, les photons, particules qui transmettent l'interaction électromagnétique. De la même façon, les variations du champ gravitationnel de la relativité générale se propagent sous forme d'ondes gravitationnelles et une théorie quantique de la gravitation devrait associer à ces ondes des particules nommées gravitons, médiatrices de l'interaction gravitationnelle.

Mais les ondes gravitationnelles sont fondamentalement tridimensionnelles : le champ varie périodiquement dans deux directions perpendiculaires à la direction du mouvement (voir l'encadré page 74).

Or dans un espace à deux dimensions, il n'y a pas de place pour un tel comportement. Une fois que la direction du mouvement est fixée, il ne reste qu'une dimension perpendiculaire. Les ondes gravitationnelles et leurs gravitons ne peuvent tout simplement pas être contenues dans deux dimensions spatiales.

Malgré quelques ponctuels regains d'intérêt, la théorie de A. Staruszkiewicz était donc restée sans suite. Jusqu'à ce qu'en 1989, Edward Witten, de l'Institut d'études avancées de Princeton, apporte une contribution décisive. E. Witten travaillait sur une classe particulière de champs où les ondes ne se propagent pas librement. Lorsqu'il s'est rendu compte que la gravitation en deux dimensions appartenait à cette classe, il a ajouté l'ingrédient crucial qui manquait : la topologie.

## Quand l'espace ressemble à une chambre à air

E. Witten a fait remarquer que même si la gravitation ne peut pas se propager sous forme d'ondes, elle peut avoir un effet sur la forme générale de l'espace, ce que les mathématiciens appellent sa topologie. La topologie décrit les caractéristiques générales d'une surface, comme le nombre de trous. Deux surfaces ont la même topologie si l'on peut passer de l'une à l'autre par une déformation continue, sans rien couper, déchirer ou coller. Un hémisphère et un disque ont par exemple la même topologie ; il suffit d'étaler le premier pour obtenir le second. Une sphère a une autre topologie : pour la transformer en un disque, il faudrait en couper un bout (au moins un point). Une chambre à air, ou tore, a encore une autre topologie, identique à celle d'une tasse munie d'une anse.

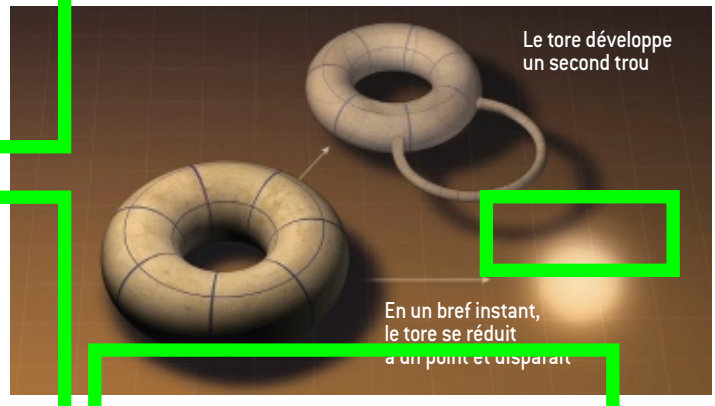
Bien que les tores apparaissent courbes vus de l'extérieur, ils sont plats du point de vue de leur géométrie interne. Ce qui caractérise un tore, c'est qu'on peut décrire une courbe fermée dans deux directions indépendantes, l'une entourant le trou et l'autre perpendiculaire. Cette caractéristique est similaire à celle de l'ancien jeu vidéo *Pac man*, où les personnages qui sortent par un côté de l'écran rentrent par le côté opposé. L'écran de jeu est plat : il obéit aux règles de la géométrie plane – par exemple deux droites parallèles ne se rencontrent jamais – mais sa topologie est celle d'un tore.

En fait, il existe une famille infinie de tores, caractérisés par un paramètre nommé module. Lié au rapport entre les tailles des deux cercles qui définissent le tore, il donne une mesure de la « forme » du tore (plus ou moins épais, avec un trou plus ou moins large, etc.).

Dans un univers à deux dimensions en forme de tore, la gravitation crée une dynamique qui fait évoluer le module, c'est-à-dire la géométrie globale du tore, au fil du temps (voir l'encadré page 75). E. Witten a montré que ce processus peut être quantifié, c'est-à-dire qu'on peut transformer la théorie classique de la gravitation en deux dimensions en une théorie quantique.

## TROUS DE VER ET AUTRES BIZARRERIES

Dans l'une des formulations de la gravitation quantique à deux dimensions, contrairement à ce qui se passe en théorie de la relativité générale, la topologie de l'univers peut changer. Cela pourrait résoudre des questions posées de longue date. Par exemple, un tore à un seul trou a une probabilité non nulle d'évoluer vers un tore doté d'une anse, c'est-à-dire à deux trous. Cela reviendrait à créer un trou de ver, un passage direct d'un endroit à un autre. L'univers pourrait aussi subitement devenir un point et disparaître.



Malcolm Godwin

Ainsi, la gravitation quantique à deux dimensions n'est pas une théorie des gravitons, mais une théorie de l'évolution de la forme globale des tores. Cette vision diffère de la représentation habituelle de la théorie quantique comme une description de l'infiniment petit. La gravitation quantique en deux dimensions est, en fait, une théorie qui porte sur l'Univers dans son ensemble en tant qu'objet contrôlé par les lois quantiques. Ce point de vue livre un modèle suffisamment riche pour explorer certains des problèmes conceptuels fondamentaux de la gravitation quantique.

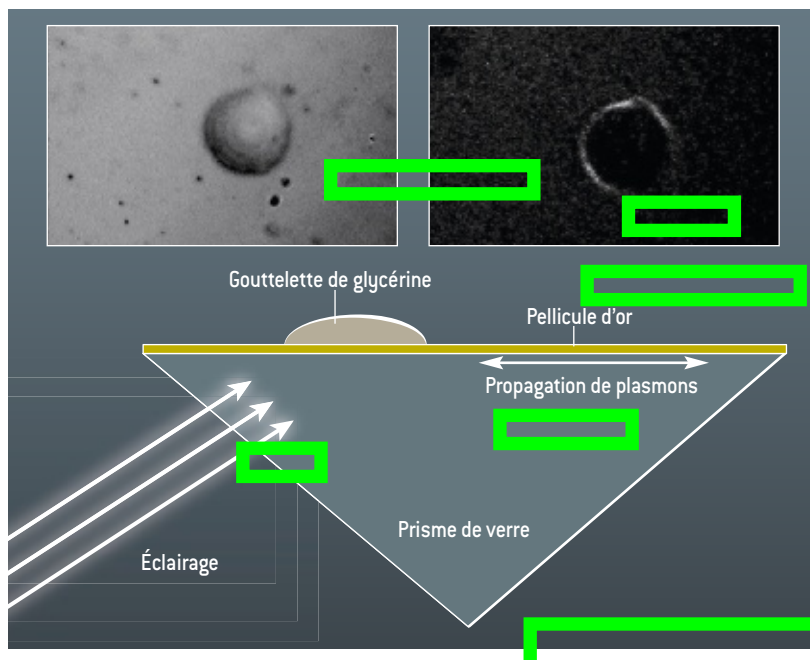
La gravitation en deux dimensions indique par exemple comment le temps pourrait émerger d'un cadre fondamentalement atemporel. Dans l'une des formulations de la théorie, l'univers entier est décrit par une unique fonction d'onde quantique. Mais cette fonction d'onde ne dépend pas explicitement du temps. En effet, le temps, lié à l'espace, est partie prenante de la géométrie et est donc inclus dans la quantification. Ce n'est pas un paramètre indépendant.

D'une façon ou d'une autre, cette fonction d'onde « atemporelle » fait émerger le flux du temps tel que nous l'observons. Selon l'aphorisme d'Einstein, le temps est ce qui est mesuré par une horloge. Cela semble être une banalité, mais signifie qu'il n'existe pas de temps absolu déconnecté de la réalité physique. Le temps est toujours déterminé par un sous-système qui est corrélé avec le reste de l'univers, par exemple le mouvement de rotation de la Terre ou la fréquence d'un rayonnement de l'atome de césium.

La théorie offre différentes options en matière d'horloge – on choisit l'évolution de toute grandeur observable – et le choix définit ce que signifie le « temps ». Une fois ce choix fait, toutes les autres observables physiques changent en fonction du temps de cette horloge.

## DES TROUS NOIRS 2D EN LABORATOIRE

Des analogues bidimensionnels des trous noirs ont été réalisés en laboratoire. Ils mettent en jeu des plasmons, des ondes électromagnétiques qui se propagent le long d'une surface métallique. Une gouttelette de liquide déposée sur la surface piège les plasmons comme un trou noir tridimensionnel piège les photons. L'analogue de l'horizon des événements se manifeste sous la forme d'un bord blanc (ci-dessous à droite). Ces systèmes électromagnétiques bidimensionnels sont susceptibles de trouver des applications en optique.



Enfin, la gravitation à deux dimensions résout une bonne nouvelle aux partisans de ces trous de vers, ces hypothétiques raccourcis entre deux points distants de l'Univers. Il existe au moins une formulation de la théorie qui autorise la topologie de l'espace à changer sous l'effet de la gravitation. Un espace torique pourrait par exemple développer une anse et devenir un tore à deux trous, ce qui revient à créer un passage entre deux régions (voir la figure page 72). Dans certaines versions de la gravitation quantique à deux dimensions, on peut même décrire la création de l'Univers à partir de rien, en d'autres termes le changement ultime de topologie.

## Des trous noirs en 2D

La gravitation étant limitée dans l'espace à deux dimensions, tous les spécialistes pensaient que les trous noirs ne pouvaient pas y exister. Et pourtant, en 1992, trois physiciens chiliens, Máximo Bañados, Claudio Teitelboim et Jorge Zanelli, ont montré que cette théorie autorise en fait l'existence de trous noirs, à condition que l'univers contienne une certaine forme d'énergie comparable à l'énergie sombre, que dans notre Univers s'oppose à l'effet de la gravitation.

Un trou noir BTZ (les initiales des trois chercheurs) ressemble assez à un vrai trou noir de notre Univers. Formé par l'effondrement de matière sous son propre poids, il est entouré d'un horizon des événements, une frontière virtuelle d'où rien ne peut s'échapper. Conformément aux calculs de S. Hawking, un trou noir BTZ devrait émettre un rayonnement correspondant à une température qui dépend de sa masse et de sa vitesse de rotation.

Cet résultat est une énigme. Dépourvue d'ondes gravitationnelles ou de gravitons, la gravitation en deux dimensions est aussi dénuée des degrés de liberté gravitationnels qui permettraient d'expliquer la température et d'autres grandeurs thermodynamiques des trous noirs. Et pourtant, ils se manifestent quand même.

C'est en fait l'horizon des événements qui apporte une structure supplémentaire faisant défaut à l'espace bidimensionnel vide. L'horizon est topologiquement équivalent à un cercle, ce qui enrichit la théorie de degrés de liberté supplémentaires : les vibrations de ce cercle. De façon remarquable, leurs propriétés correspondent exactement aux résultats de S. Hawking.

## L'AUTEUR

Steven CARLIP est professeur à l'Université de Californie à Davis (États-Unis).

## BIBLIOGRAPHIE

C. Callender, *Le temps est-il une illusion ?*, Pour la Science, n° 397, novembre 2010. <http://bit.ly/397callender>

Juan Maldacena, *La gravité est-elle une illusion ?*, Pour la Science n° 339, janvier 2006. <http://bit.ly/339maldacena>

S. Carlip, *Quantum gravity in 2+1 dimensions*, The case of a closed universe, Living Reviews in Relativity, vol. 8, 2005. [www.livingreviews.org/lrr-2005-1](http://www.livingreviews.org/lrr-2005-1)

S. Carlip, *Quantum Gravity in 2+1 Dimensions*, Cambridge University Press, 1998.

Dans le tore-univers, le module est par exemple corrélé avec la taille du tore, et un habitant perçoit son évolution comme une évolution de la taille de l'univers au fil du temps. La théorie introduit donc le temps à partir d'un univers atemporel. Ces idées ne sont pas nouvelles, ni spécifiques à la gravitation en deux dimensions, mais ce modèle fournit un cadre dans lequel on peut faire des calculs et vérifier la validité de cette approche.

Quant au problème des observables, l'espace toroidal offre une quantité mesurable, à savoir le module. C'est une observable non locale : elle ne prend pas de valeurs en des points précis, mais décrit la structure de l'espace entier. Tout ce qu'on peut mesurer de l'intérieur de l'espace à deux dimensions, c'est en fin de compte par son intermédiaire. En 2008, Catherine Meusburger, maintenant à l'Université d'Erlangen-Nuremberg en Allemagne, a par exemple montré comment le module est lié à des mesures cosmologiques concrètes telles que le décalage vers le rouge de rayons lumineux. J'ai pour ma part montré qu'il est lié au mouvement des objets.

Comme les degrés de liberté sont des caractéristiques de l'horizon, on peut dire en un sens qu'ils résident au « bord » de l'espace à deux dimensions. Ils constituent donc une réalisation d'un des principes les plus subtils de la gravitation quantique, le principe holographique. Tout comme un hologramme enregistre une image tridimensionnelle sur une pellicule à deux dimensions, ce principe énonce que la physique d'un univers à  $n$  dimensions peut être entièrement décrite par une théorie plus simple à  $(n-1)$  dimensions. Dans la théorie des cordes – la théorie la plus aboutie pour unifier la relativité générale et la physique quantique –, cette idée a conduit à une approche novatrice pour créer une théorie quantique de la gravitation.

La gravitation en deux dimensions est un scénario simplifié sur lequel on pourrait tester cette approche. Mais il y a quatre ans, Edward Witten et Alexander Maloney, aujourd'hui à l'Université McGill, ont créé la surprise en suggérant que les prédictions de la théorie holographique

pourraient échouer dans le cadre bidimensionnel. Les trous noirs auraient des propriétés thermiques incohérentes.

## Un modèle bien fécond

Si ces théoriciens ont raison, alors la gravitation en deux dimensions est un phénomène encore plus subtil que nous ne l'avons inspecté jusqu'à présent. Peut-être n'y a-t-il pas de sens en elle-même et doit-elle être couplée avec d'autres types d'interactions et de particules. Peut-être le principe holographique n'est-il pas toujours valable. Peut-être l'espace, comme le temps, n'est-il pas un ingrédient fondamental de l'univers. Ou encore peut-être faut-il trouver un moyen de réintroduire des degrés de liberté au niveau local. Dans tous les cas, la gravitation en deux dimensions a indiqué une voie d'exploration que nous n'aurions sans doute pas empruntée autrement.

Même s'il nous est impossible de fabriquer un véritable trou noir en deux dimensions, nous pourrions réussir à tester

expérimentalement certaines des prédictions de la théorie quantique de la gravitation en deux dimensions. Plusieurs équipes travaillent sur des analogues bidimensionnels des trous noirs. Un fluide s'écoulant plus vite que la vitesse du son produit par exemple un horizon des événements auquel les ondes sonores quantifiées (les phonons) ne peuvent pas s'échapper. Les expérimentateurs ont également construit des trous noirs bidimensionnels à l'aide de plasmons, des ondes électromagnétiques confinées sur des surfaces (voir l'encadré page 78). De tels dispositifs devraient présenter un analogue du rayonnement quantique des trous noirs.

La gravitation quantique en deux dimensions était au départ un simple cadre destiné à explorer des idées sur la gravitation quantique dans le monde réel. Mais ce modèle nous a surpris par sa richesse : le rôle important de la topologie, ces trous noirs remarquables, ses étranges propriétés holographiques. Abbott n'aurait sans doute pas cru que *Flatland* se révélerait si fécond ! ■



## HISTOIRE DES SCIENCES

## Halley, Mairan et les aurores boréales

Quelle est l'origine des aurores boréales ? Le magnétisme terrestre proposé par le Britannique Halley en 1716 ou l'atmosphère solaire invoquée par le Français Dortous de Mairan en 1733 ? La question ne fut résolue qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle

Stéphane LE GARS

C'était une manière d'aurore boréale, ou plutôt australe. [...] Un chevron couleur de feu dont les jambes s'appuyoient l'une à peu près sur l'Orient, & l'autre sur l'Occident.

Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, une recrudescence d'aurores boréales en Europe, telle celle décrite ici en février 1730 par un observateur à Montpellier (et rapportée par Mairan), conduit la Société royale de Londres et l'Académie des sciences de Paris à demander des explications rationnelles du phénomène. Celui-ci, en effet, inquiète et effraie la population, qui y voit un événement surnaturel : les aurores boréales, de même que les comètes, les éclipses ou les tremblements de terre, sont accompagnées d'un imaginaire symbolique fort, présageant des

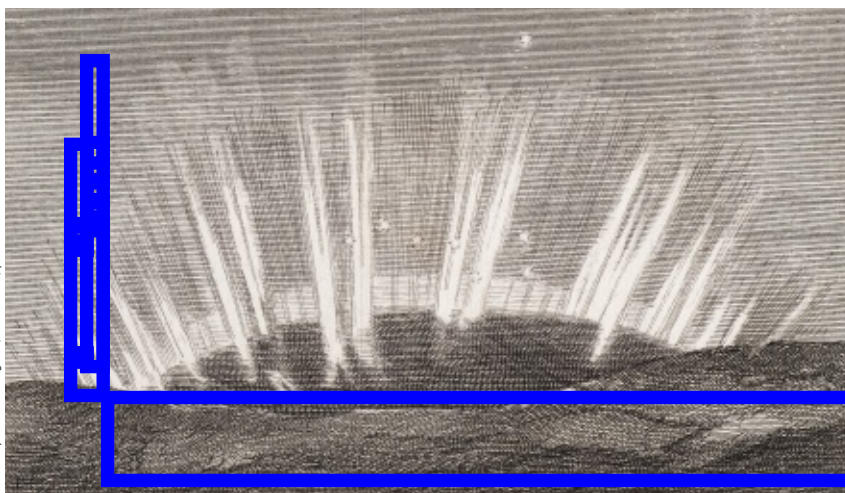
désastres. En Écosse, par exemple, les aurores sont souvent prises pour des batailles ayant lieu dans le ciel, les couleurs rouges représentant des bains de sang. C'est dans ce contexte que les deux sociétés savantes vivent respectivement Edmond Halley et Jean-Jacques Dortous de Mairan, deux astronomes, à proposer une théorie explicative de ces apparitions colorées, fondées sur les lois de la nature.

Ainsi que Halley invoque des fluides magnétiques émanant des pôles, Mairan, de son côté, refuse de faire intervenir l'électricité ou le magnétisme, pour privilégier le rôle de l'atmosphère solaire. Deux théories s'affrontent alors. Laquelle vainquit ? Les deux, direz-vous : nous savons aujourd'hui que chacune possède une part de vérité, les aurores boréales étant le fruit de l'ionisation

de particules de la haute atmosphère par des particules chargées éjectées du Soleil et piégées dans le champ magnétique terrestre. Pourtant, les choses n'ont pas été aussi simples. Tandis que l'idée de Halley s'imposait dans les milieux savants, confortée au début du XIX<sup>e</sup> siècle par les découvertes sur l'électricité et le magnétisme, celle de Mairan fut critiquée, discréditée, et mit plus d'un siècle à faire son chemin, au gré d'arguments scientifiques, mais aussi politiques et économiques.

## Un fluide magnétique aimanté par la Terre

C'est à la suite de l'aurore spectaculaire du 6 mars 1716 que Halley propose sa théorie rationnelle du phénomène. Son étude tente de dégager l'aurore tout à la fois d'un imaginaire populaire et d'une explication aristotélicienne qui l'attribue à un phénomène météorologique. Avec Halley, l'aurore reste un phénomène atmosphérique, comme dans la physique d'Aristote, mais dû à des vapeurs brillantes issues de la Terre. En 1714, il penchait pour la vapeur d'eau brillant dans l'air, car dilatée par un feu souterrain, et teintée de vapeurs soufrées provenant de l'intérieur de la Terre. En 1716, après l'observation de l'aurore du 6 mars, Halley modifie sa théorie : il suppose que les vapeurs ne sont pas aqueuses mais magnétiques. Il imagine la Terre comme un immense aimant, autour duquel les effluves magnétiques, à l'origine de la lumière observée, se comporteraient comme de la limaille de fer. Sa théorie non seulement explique l'apparition fréquente des aurores près des pôles, mais est renforcée



1. AURORE BORÉALE VUE À BREUILLÉPONT, dans l'Eure, le 26 septembre 1731 à 9 heures, par Jean-Jacques Dortous de Mairan et rapportée dans son *Traité physique et historique de l'aurore boréale* (2<sup>de</sup> édition, 1754).



© Arnd Heide / Shutterstock Images/Corbis

par l'indépendance du mouvement des étoiles et de celui des aurores : tout semble se passer dans l'atmosphère et non dans le cosmos.

Mairan, quant à lui, est sollicité après l'aurore boréale du 19 octobre 1726, observée en France et qui suscita une grande panique. Son *Traité physique et historique de l'aurore boréale*, publié en 1733, apparaît par plusieurs aspects dans la continuité des travaux de Halley. Comme son prédécesseur britannique, il a collecté nombre de données historiques. Il a cependant étendu son étude à un champ beaucoup plus vaste de données : 1 441 observations d'aurores depuis l'année 512, qu'il a organisées dans une table afin de repérer les régularités dans l'apparition du phénomène et saisir son origine. Mairan mène par ailleurs son investigation dans le même style que Halley : il décrit de façon détaillée et précise les formes, couleurs et changements de l'aurore. Son objectif, cependant, diffère de celui de Halley : il cherche non des singularités, mais des éléments permanents dans l'espoir d'en dégager une loi physique.

Sa théorie, quant à elle, rompt radicalement avec celle de Halley. Il propose une théorie cosmique où la cause de l'aurore est attribuée à la lumière zodiacale, une faible lueur triangulaire observée la nuit dans la zone où le Soleil s'est couché et découverte par Jean Cassini en 1685 (voir la figure 4). Mairan l'identifie à l'atmosphère solaire, un fluide rare et très finement ramassé,

et donc invisible, hormis durant les éclipses solaires et par le biais de cette lumière zodiacale. Il valait une théorie éloignée de tout système de pensée, la voulant uniquement induite d'observations : « Nous tâcherons, autant qu'il nous sera possible, de conserver à nos recherches l'avantage de se soutenir avec tous les systèmes, en n'admettant que des observations et des faits qui puissent être avoués de part & d'autre. »

## Lumière zodiacale et pesanteur

À cette époque en effet, deux systèmes de pensées s'affrontent, fondés respectivement sur les idées de Newton et de Descartes. Si les calculs sur le mouvement des planètes donnent à Newton un avantage certain sur Descartes, les thèses cartésiennes ne sont pas abandonnées pour autant car elles expliquent aussi certains phénomènes physiques. Mairan met donc un point d'honneur à ne privilégier aucune.

De Newton, il accepte l'idée d'une pesanteur universelle, avec laquelle il explique comment l'atmosphère du Soleil se retrouve piégée dans l'atmosphère terrestre : « Il est certain comme on le démontrera d'après un grand nombre d'observations qui ne sont pas équivoques, que l'atmosphère du Soleil vue en qualité de lumière zodiacale, atteint quelquefois jusqu'à l'orbite terrestre et au-delà. C'est alors que la matière qui compose

**2. UNE AURORE BORÉALE** photographiée en Norvège. On sait aujourd'hui que les aurores sont produites par l'ionisation de particules de la haute atmosphère par des particules chargées éjectées du Soleil et piégées dans le champ magnétique terrestre. Lorsque leur cortège électronique se réarrange, les particules ionisées émettent des photons de couleurs variées qui, ensemble, créent l'aurore boréale.

### L'AUTEUR



Stéphane LE GARS est historien de l'astronomie associé au Centre François Viète, à l'Université de Nantes.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Le Gars, *Portraits de Mairan et la théorie des aurores polaires : Trajectoire et circulation d'une idée, de 1733 à 1933*, dans O. Bruneau et I. Passeron (dir.), *Colloque De tous de Mairan*, « physiciens-philosophes » (1678-1771), *Revue d'histoire des sciences*, Armand Colin, à paraître en 2012.

J. M. Briggs, *Aurora and enlightenment eighteenth-Century explanations of the Aurora Borealis*, *Isis*, vol. 58, pp. 491-503, 1967.

cette atmosphère venant à rencontrer les parties supérieures de notre air, en deçà des limites où la pesanteur universelle commence à agir avec plus de force vers le centre de la Terre que vers le Soleil, tombe dans l'atmosphère terrestre à plus ou moins de profondeur, selon que la pesanteur spécifique est plus ou moins grande, et d'égard aux couches d'air qu'elle traverse, et sur lesquelles elle se soutient. » Toutefois, Mairan précise qu'il ne prend pas position sur les causes de cette pesanteur : seul lui importe le fait que l'expérience (le mouvement des planètes) justifie l'existence de cette loi.

De Descartes, Mairan s'inspire de la représentation du monde – une infinité de systèmes solaires, chacun étant un tourbillon de matière centré sur un Soleil – pour décrire la nature de l'atmosphère solaire, assimilée à la lumière zodiacale. Comme Cassini, il

pense que cette lumière résulte d'un amas prodigieux de matière qui environne le corps du Soleil. L'un encore, cependant, il se défend de rechercher la raison de cet amas : « Nous n'examinons point si la matière qui compose cette atmosphère, est une émanation du corps du Soleil, une espèce d'effervescence ou de dépuracion de ses parties les plus grossières, comme il semble que Descartes l'a pensé, ou si ce n'est qu'un amas de parties hétérogènes répandues dans l'éther, qui se rassemble de toutes parts, & qui tombe vers le Soleil, comme on pourroit le recueillir des écrits de M. Newton. Cet examen ne seroit pas moins inutile que supérieur à nos connoissances : il ne s'agit ici que de chercher la nature de cette matière d'après les effets les plus immédiats. »

La première critique tombe dès 1746, dans un article du mathématicien suisse

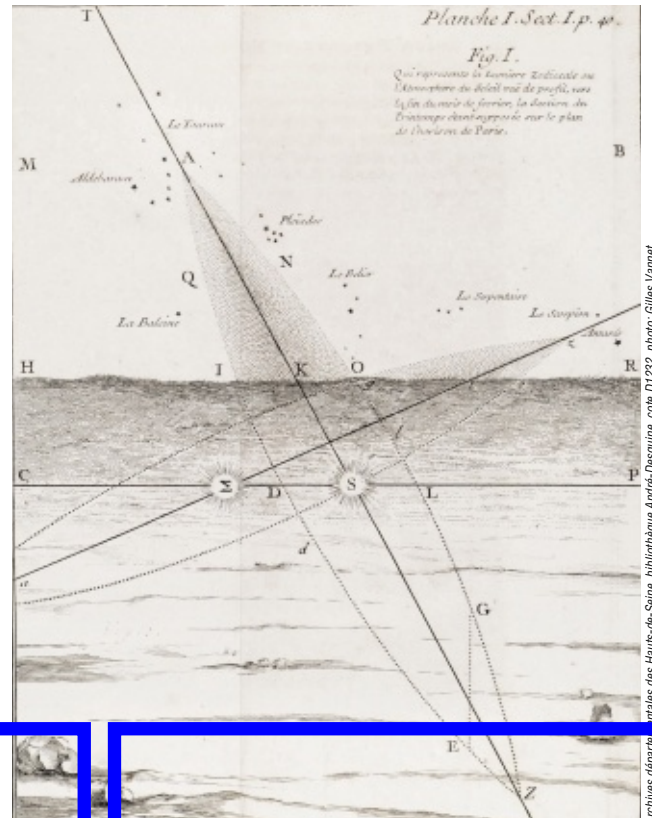
DE L'AURORE BORÉALE. Sect. IV. Ch. IV. 213

TABLE abrégée, ou Réduction du Dénombrement précédent.

| AURORES Boréales qui ont paru. | Janvier. | Février. | Mars. | Avril. | Mai. | Juin. | Juillet. | Septembre. | Octobre. | Novembre. | Décembre. | SOMMES pour les Années. |
|--------------------------------|----------|----------|-------|--------|------|-------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-------------------------|
| De 1600 à 1650                 | 3        | 1        |       |        |      |       | 1        | 2          | 3        | 7         | 3         | 27                      |
| De 1650 à 1700                 | 2        | 7        | 2     | 2      |      | 1     |          | 1          | 3        | 6         | 4         | 28                      |
| De 1700 à 1750                 | 2        |          |       |        |      | ***   |          |            |          |           |           | 4                       |
| De 1750 à 1800                 |          | 1        | 2     |        |      |       |          | 1          | 1        |           |           | 7                       |
| En 1801                        |          |          | 2     | 3      |      |       |          |            |          |           | 2         | 7                       |
| En 1817                        | 4        |          |       |        |      |       |          |            | 1        |           |           | 5                       |
| En 1818                        |          |          | 1     |        |      |       |          |            | 4        | 1         | 1         | 8                       |
| En 1819                        |          | 1        | 2     | 1      |      |       |          |            |          | 3         | 1         | 8                       |
| En 1820                        | 1        | 3        | 1     |        |      |       |          | 1          | 2        | 1         | 1         | 10                      |
| En 1821                        | 2        | 2        | 1     |        |      |       |          |            | 2        | 1         |           | 8                       |
| En 1822                        | 4        | 1        |       |        |      |       |          |            | 4        | 4         | 1         | 15                      |
| En 1823                        | 1        | 1        | 3     | 1      |      |       |          |            | 1        | 1         | 1         | 10                      |
| En 1824                        |          |          | 1     |        |      |       |          |            | 1        |           |           | 2                       |
| En 1825                        | 1        |          |       |        |      |       |          |            | 3        |           |           | 4                       |
| En 1826                        |          |          |       |        |      |       |          |            | 1        | 3         | 3         | 7                       |
| En 1827                        | 3        |          | 3     |        |      |       |          |            |          | 2         |           | 8                       |
| En 1828                        |          | 4        | 3     | 3      |      | 1     | 3        | 3          | 4        | 6         | 3         | 30                      |
| En 1829                        | 1        |          |       |        | 1    | 2     |          |            | 2        | 1         | 1         | 8                       |
| En 1830                        | 1        | 2        | 2     | 2      |      | 1     |          |            | 2        | 4         | 3         | 16                      |
| En 1831                        |          |          |       |        |      |       |          |            | 5        | 10        | 2         | 17                      |
| SOMMES pour les Années.        | 31       | 27       | 22    | 12     | 1    | 3     | 7        | 9          | 14       | 26        | 15        | 229                     |

De 1831

3. LES AURORES BORÉALES ENTRE 1600 ET 1831 recensées et rassemblées par Mairan dans son *Traité* (1733). En réunissant ainsi tous ces événements, l'astronome espérait repérer une régularité qui le conduirait à la compréhension du phénomène.



4. LA LUMIÈRE ZODIACALE ou l'atmosphère du soleil vue de près, vers la fin février 1683, le soir (zone pointillée IKOA) et au petit matin (zone gtez), et les positions associées du Soleil (respectivement S et Σ), derrière l'horizon HR, sur une planche du *Traité* de Mairan (2<sup>e</sup> édition, 1733).

Leonhard Euler. Selon lui, l'atmosphère solaire ne peut s'étendre jusqu'à la Terre. C'est l'impulsion des rayons solaires sur la matière aurorale qui produit les effets observés, tout comme cela se produit dans la queue des comètes. En réponse, Mairan publie en 1754 une seconde édition de son *Traité*, qui complète la première par des éclaircissements aussi longs que le mémoire initial. Euler n'apporte aucune défense, et la situation évolue vers un dédain, ou du moins une ignorance mutuelle des trois principaux auteurs d'une théorie aurorale au XVIII<sup>e</sup> siècle. Halley, Mairan et Euler étant chacun persuadé de la solidité de sa théorie.

## Le magnétisme triomphe...

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'engouement pour le magnétisme favorise encore la thèse de Halley au détriment de celle de Mairan. En 1820, la découverte de la connexion entre l'électricité et le magnétisme par le physicien danois Hans Christian Oersted encourage deux savants parisiens, François Arago et Alexandre de Humboldt, à dégager une nouvelle vision du monde où éléments et phénomènes sont interconnectés. Les deux hommes veulent mettre au jour une physique du ciel et de la Terre qui montrerait cette interconnexion. Selon eux, cette vision globale et unifiée du cosmos ne s'appréhende que par l'observation systématique et précise des particularités et des singularités – dont les aurores boréales. Dans cette pensée cosmique, le magnétisme joue un rôle particulier : l'indication de la boussole est un élément de mesure du monde, qui doit être enregistré de façon systématique sur tous les points du globe, afin de rendre visible l'invisible et de dévoiler le cosmos.

Le magnétisme est ainsi privilégié dans la description des aurores boréales. En 1825, Arago écrit que « les zones, les arcs, les jets lumineux, dont les aurores boréales se composent, alors même qu'ils ne sont pas visibles dans un lieu donné, y exercent une influence manifeste sur la position de l'aiguille aimantée. Les journaux des deux célèbres navigateurs [Perry et Franklin] que je viens de citer, comparés avec ceux de

d'observations magnétiques, ne laisseront pas à cet égard l'ombre d'un doute ». Pour Arago, cette relation entre magnétisme et aurore s'élargit même à l'électricité de par leur interconnexion : on s'est d'ailleurs aperçu que les aurores perturbent tout autant les aiguilles magnétiques que les tout récents télégraphes électriques.

Lorsque Arago en vient à s'interroger sur les causes des aurores boréales, il ne peut que constater une ignorance totale, tout en appelant à continuer l'enregistrement des observations et des particularités de chaque phénomène, en lien avec le magnétisme. À Halley, il attribue la paternité d'une relation entre magnétisme et aurores. Il critique en revanche les hypothèses de Mairan sur l'identité de la lumière aurorale et le rôle de l'atmosphère solaire en reprenant l'argument d'Euler. Selon Arago, la lumière zodiacale ne peut se retrouver piégée dans l'atmosphère terrestre car, à cause des frottements, l'atmosphère solaire tourne autour du Soleil à une vitesse telle que la pesanteur terrestre n'est pas assez grande pour happer de la matière solaire. L'aurore boréale est donc un phénomène atmosphérique et non cosmique.

C'est aussi la conclusion de Humboldt, en 1858, dans son *Cosmos : essai d'une description physique du monde* : « D'intimes rapports unissent à la fois le magnétisme du globe et les forces électrodynamiques qu'Ampère a mesurées à la production de la lumière solaire, ainsi qu'à la chaleur de notre planète, dont les pôles magnétiques sont considérés comme des pôles de froid. Il y a plus de 128 ans, Halley soupçonnait que les aurores boréales pourraient bien être de simples phénomènes magnétiques : aujourd'hui, la brillante découverte de Faraday, qui fit naître de la lumière par l'action des seules forces magnétiques, a donné à ce vague soupçon la valeur d'une certitude expérimentale. » Pour Humboldt, l'aurore est un orage magnétique, l'équivalent (magnétique) des éclairs (d'origine électrique) que l'on aperçoit lors d'un orage.

La théorie cosmique de Mairan est donc discréditée au profit de la théorie atmosphérique de Halley, chez des savants pourtant tenants d'une vision cosmique du monde. En fait, l'objectif de Humboldt et Arago s'ap-

parente plus à la construction d'une physique du globe, où le voyage scientifique est un élément déterminant de leur méthode. À cette époque sous l'influence d'Arago, le grand patron de l'astronomie française, l'Observatoire de Paris domine le monde savant et impose la valeur de l'intensité magnétique à Paris comme référence pour la plupart des observateurs continentaux ; mais des réactions apparaissent, notamment en Grande-Bretagne et en Allemagne. S'il veut conserver son hégémonie, il doit donner des chiffres toujours plus précis, d'autant que deux physiciens allemands, Gauss et Weber, ont mis au point une théorie mathématique qui fournit une bonne approximation du magnétisme terrestre. Aussi Arago et Humboldt étudient-ils les aurores boréales avant tout comme un facteur d'influence du magnétisme terrestre, qui doit être mesuré et précisé vis-à-vis des éléments permanents fournis par la théorie de Gauss et Weber.

## ... avant le retour de Mairan

Ce n'est qu'à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que le monde savant s'intéresse à nouveau à l'origine des aurores boréales. Le télégraphe est devenu un moyen de communication répandu, et l'influence de l'électricité atmosphérique sur les phénomènes météorologiques et la qualité de la transmission un enjeu important. Non seulement sa thèse n'est plus exclue, mais Mairan est de plus en plus cité pour la rigueur de sa méthode (par le physicien Alexandre Dauvillier, notamment). Avec la découverte des rayonnements cosmiques au début du XX<sup>e</sup> siècle, il devient même l'icône emblématique d'une nouvelle discipline, la physique cosmique.

Par rapport à Halley, toujours influencé par une philosophie du merveilleux qui marque encore le XVII<sup>e</sup> siècle, Mairan a cherché à construire une méthode qui, au travers des régularités observées dans l'histoire des phénomènes, vise à faire sortir ces derniers du surnaturel. En ce sens, Mairan a largement participé à la construction de notre rationalité moderne. C'est précisément sur ce point qu'il est le plus intéressant. Au début du XX<sup>e</sup> siècle.

## LOGIQUE &amp; CALCUL

# La malédiction de la mauvaise file

*Sur la route, quand vous êtes pris dans un ralentissement, la file voisine semble presque toujours plus rapide que la vôtre. Vérité ou impression ?*

Jean-Paul DELAHAYE

**V**ous êtes sur l'autoroute, la circulation est chargée. Vous hésitez entre la voie de gauche et la voie de droite. Vous changez une première fois, puis une deuxième, et encore et encore. Au bout de quelques minutes, vous perdez patience : « C'est quand même un peu fort, je suis toujours sur la mauvaise file, sans cesse on me double et si je change de file, c'est la voie que je viens de quitter qui accélère. »

Tous les automobilistes ont ressenti cette curieuse sensation de persistante malchance, évidemment impossible : tout le monde ne peut pas toujours être sur la mauvaise file, ni même y être presque toujours ! Cette impression de toujours tomber dans la mauvaise file a intrigué les scientifiques. Ils ont procédé à des enquêtes, à des simulations informatiques et à des calculs mathématiques. Des explications variées et des réflexions inattendues ont été proposées sur ce thème étrange...

Notons que les files des magasins, des banques, des cinémas et des administrations provoquent le même sentiment d'injustice obstinée et engendrent la même impatience : bien des remarques proposées ici pour les files de voitures y restent valables. Voyons les solutions fantaisistes au paradoxe de la mauvaise file.

• **Explication par la loi de Murphy (vulgairement : loi de l'emmerdement maximum).** « Si ça peut mal se passer, ça se passera mal. Il n'y a donc rien d'étonnant à se retrouver toujours dans la mauvaise file. » Bien sûr, invoquer cette loi est ridicule : il es

absurde de croire que tout le monde a tout le temps de la malchance en tout !

• **Explication par la maladresse.**

« Les files avancent alternativement l'une plus vite que l'autre, et moi, gros maladroit, je change de file quand cela va bientôt être à la mienne d'avancer. »

Celui qui s' imagine être poursuivi par la mauvaise file peut se satisfaire de cette explication, mais là encore ce n'est pas sérieux. À moins d'une raison particulière et identifiée, il n'est pas rationnel de penser qu'une personne, quelle qu'elle soit, change toujours malencontreusement de file.

Ces deux premières explications irrecevables amènent la question : *Y a-t-il une illusion de mauvaise chance de la part des automobilistes ?* Une expérience menée par deux chercheurs canadiens, Donald Redelmeier et Robert Tibshirani, a établi que c'est le cas.

Des ingénieurs d'une voiture prise dans un ralentissement, ils ont longuement filmé la file voisine. Une séquence de plusieurs minutes a été sélectionnée, comportant un grand nombre de dépassements soit de la file voisine soit de la file de la voiture portant la caméra. La séquence retenue est telle que pendant sa durée la voiture portant la caméra est légèrement plus rapide que la file voisine. Celui qui est dans la voiture de la caméra doit donc juger qu'il a de la chance et ne pas être tenté de changer de file. Le film sélectionné a été projeté à

120 sujets, qui ont indiqué à l'issue de la projection comment ils avaient évalué la situation. Une proportion de 86 % des sujets

a jugé que le film était réaliste, 70 % des sujets ont considéré que la file voisine avançait plus vite que celle de la caméra, et 65 % ont admis qu'au volant de la voiture à la caméra ils auraient changé de file.

L'illusion de malchance est patente. Reste à l'expliquer par des considérations raisonnables.

## Biais de mémorisation ?

• **Explication par un biais de mémorisation dû à des oublis sélectifs.**

« Je me souviens mieux de ce qui est désagréable que de ce qui est agréable. Donc même si ce n'est pas vrai, j'ai l'impression d'être plus souvent dépassé que l'inverse. »

Les psychologues qui ont étudié ces questions ont conclu que s'il y a des biais de mémorisation liés aux situations de plaisir et de déplaisir, ils conduisent le plus souvent, au contraire, à oublier sélectivement ce qui est pénible, provoquant même dans certains cas extrêmes des amnésies graves des événements traumatisants. Une tentative d'explication de l'illusion de la mauvaise file par les biais généraux de mémorisation ne semble donc pas possible.

• **Explication par un biais de mémorisation dû aux conditions d'observation.**

« À l'arrêt, je m'ennuie, mon cerveau est disponible, je regarde la file d'à côté plus aimée que la mienne. Lorsque je suis dans la file rapide, je suis concentré sur la voiture qui me précède, je ne regarde pas la file

**1. EMBouteillage MONSTRE :**

23 voies de circulation, toutes bloquées  
sur plusieurs dizaines de kilomètres...  
Avez-vous intérêt à changer de file  
si la vôtre vous semble plus lente ?



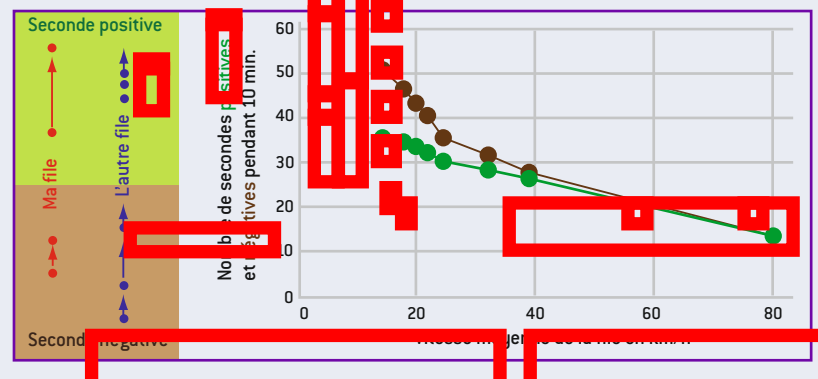
© 2012

## 2. Doubler ou être doublé ?

L'illusion de la file lente (croire qu'on se trouve toujours dans la plus mauvaise file d'un ralentissement autoroutier) provient de la dynamique des files de véhicules. Les files lentes sont denses, alors que les files rapides sont composées de voitures en général bien

espacées. Même lorsque ma file et la file voisine avancent en moyenne à la même vitesse, je vis plus de « secondes négatives » (secondes pendant lesquelles je suis dépassé) que de « secondes positives » (secondes pendant lesquelles je suis devant).

Cette explication proposée par le chercheur allemand Rüdiger Weidmann et Robert Tibshirani a été testée par des simulations informatiques.



d'à côté. De ce fait, je surestime le nombre de cas où je suis dépassé. »

À cette explication plausible, s'ajoute une autre explication du même type :

« Quand je suis doublé, je le suis par des véhicules largement espacés, car ils vont assez vite. Je les vois passer les uns après les autres très distinctement et longuement puisqu'ils partent devant moi. En revanche, lorsque je double une file de voitures immobilisées ou presque immobilisées, elles sont serrées, je les double très vite souvent à raison de plusieurs par seconde. »

Comme la précédente, cette explication est assez vraisemblable. Pour lui donner de la consistance, D. Redelmeier et R. Tibshirani ont simulé informatiquement un ralentissement autoroutier, mesuré les flux de véhicules ainsi créés et mesuré l'impression subjective qu'en tire un automobiliste présent dans ces files artificielles.

Les embouteillages simulés étaient tels que toutes les files avançaient à la même vitesse moyenne : aucun automobiliste ne devait s'y trouver favorisé ou défavorisé. Dans leur modèle informatique, le véhicule d'un encombrement simulé possédait

un objectif de vitesse (par exemple 90 km/h). S'il roula à une vitesse inférieure et qu'il n'y avait pas d'autre véhicule juste devant lui, il accélérera jusqu'à atteindre cette vitesse, qu'il ne dépassera pas. Bien sûr, si un véhicule B est devant et roule moins vite qu'un véhicule A, le véhicule A ralentit pour éviter le choc, adopte la vitesse de B en laissant une distance de sécurité entre B et lui.

### Davantage de secondes négatives que de positives !

Des études menées en psychologie ont montré que les gens pris dans des queues parallèles évaluent leur vitesse en regardant les files voisines. D'où l'idée de définir des *secondes positives* et des *secondes négatives*. Une seconde positive est, par définition, un intervalle de temps d'une seconde pendant lequel je dépasse une ou plusieurs voitures. Une seconde négative est un intervalle de temps d'une seconde durant lequel je suis dépassé par une ou plusieurs voitures.

Dans les simulations réalisées, une proportion relativement faible des secondes évaluées était des secondes positives ou des secondes négatives. Sur une période de 10 minutes, les chercheurs ont trouvé une moyenne de 76 des 600 secondes dans l'une des deux catégories. Les résultats des simulations indiquent que sur 600 secondes, 43 sont négatives et 33 positives, ce qui explique l'illusion de la mauvaise file, qui est donc non seulement réelle, mais compréhensible grâce au modèle informatique.

Bien sûr, lorsque deux files avancent à la même vitesse moyenne, une voiture est dépassée en moyenne autant de fois qu'elle dépasse (46 fois sur une période de 10 minutes dans la simulation). L'inégalité vient du fait mentionné plus haut que les dépassements que l'on fait ont tendance à se produire de manière rapprochée (plusieurs par seconde), alors que les dépassements que l'on subit sont plus espacés (donc moins souvent regroupés dans une même seconde).

La conclusion est bien évidemment que si aucune file n'est plus rapide qu'une autre, il faut corriger notre jugement. C'est important du point de vue de la sécurité, car tout changement de file entraîne un certain risque. Il est stupide de prendre inutilement le risque de dépasser les conducteurs pour qu'ils soient conscients de l'illusion de la mauvaise file et diminuerait les accrochages.

Ces explications proposées par les chercheurs canadiens sont complétées par d'autres études fondées uniquement sur le calcul.

Le problème posé n'est pas exactement le même, mais il confirme qu'il y a des raisons identifiées de se tromper quand on tente d'évaluer la vitesse moyenne des autres véhicules sur une route ou une autoroute.

Lorsque vous roulez à une certaine vitesse, cette fois sur une autoroute dégagée, vous ne voyez pratiquement aucune voiture roulant à la même vitesse que la vôtre : soit un véhicule roule à la même vitesse que vous, soit vous ne le dépassez pas et vous n'êtes pas dépassé par lui !

Quelqu'un qui tente de calculer la moyenne des vitesses des voitures présentes en même temps que lui sur l'autoroute en

prenant en compte les véhicules qu'il aperçoit (par exemple pendant une heure) fera un calcul biaisé. Il ne verra pratiquement aucune voiture roulant à des vitesses proches de la sienne, il verra un peu plus les voitures dont la différence de vitesse avec la sienne est de 10 km/h et il verra de nombreuses voitures sensiblement plus rapides que la sienne, ou sensiblement plus lentes.

## Des biais d'observation

Comment le biais d'observation se traduit-il ? Bryan Dawson et Troy Riggs, tous deux professeurs de mathématiques à l'Union University de Jackson, ont mené des calculs pour répondre à ces questions. Ils ont supposé que les vitesses des voitures sur une autoroute (sans bouchon) se répartissent selon une loi normale, ce qui est l'hypothèse la plus raisonnable. Sur cette base, ils ont calculé le biais d'observation des automobilistes qui tentent d'évaluer la vitesse des autres automobilistes en faisant la moyenne des vitesses qu'ils observent pour les véhicules qui les dépassent et ceux qu'ils dépassent (les automobilistes calculant ces moyennes disposent de moyens pour connaître la vitesse des véhicules et la leur).

Le biais d'observation dépend bien sûr de la vitesse de celui qui fait l'évaluation. Les courbes de la figure 3 montrent les résultats des calculs :

— Si vous êtes un peu au-dessous de la moyenne générale des véhicules de l'autoroute, vous aurez l'impression que les voitures roulent plus rapidement que cette moyenne. Vous aurez donc le sentiment d'être particulièrement lent, ce qui sans doute vous incitera à accélérer un peu.

— Si, au contraire, vous êtes un peu au-dessus de la moyenne générale, vous percevrez la moyenne des autres véhicules comme sensiblement inférieure à ce qu'elle est vraiment. Vous aurez donc le sentiment d'être vraiment trop rapide par rapport aux autres véhicules, ce qui vous encouragera à ralentir.

L'effet global de la mauvaise appréciation des vitesses des autres véhicules dans le cas d'un trafic fluide est donc favorable à la sécurité de tous : il tend à uniformiser les vitesses et augmente donc la sécurité.

Les biais de perception n'ont pas nécessairement des effets désastreux !

Nous ne pouvons cependant qu'il n'y a pas de contradiction entre les conclusions des chercheurs canadiens obtenues par simulation et les conclusions des mathématiciens de l'Université de Jackson. En effet, bien que s'appliquant aux situations de circulation fluide (à cause de l'hypothèse d'une distribution normale des vitesses), il n'est pas absurde de penser que la surévaluation de la vitesse des autres véhicules aperçus par un véhicule lent s'applique grossièrement aussi aux voitures posées dans un embouteillage.

Le calcul mathématique de B. Dawson et T. Riggs confirme l'idée des Canadiens : dans une file lente, on surévalue la vitesse moyenne des autres véhicules, ce qui incite à changer de file inutilement : l'effet intéressant d'accélération des files lentes et de ralentissement des files rapides dans un trafic fluide devient dangereux dans le cas des embouteillages.

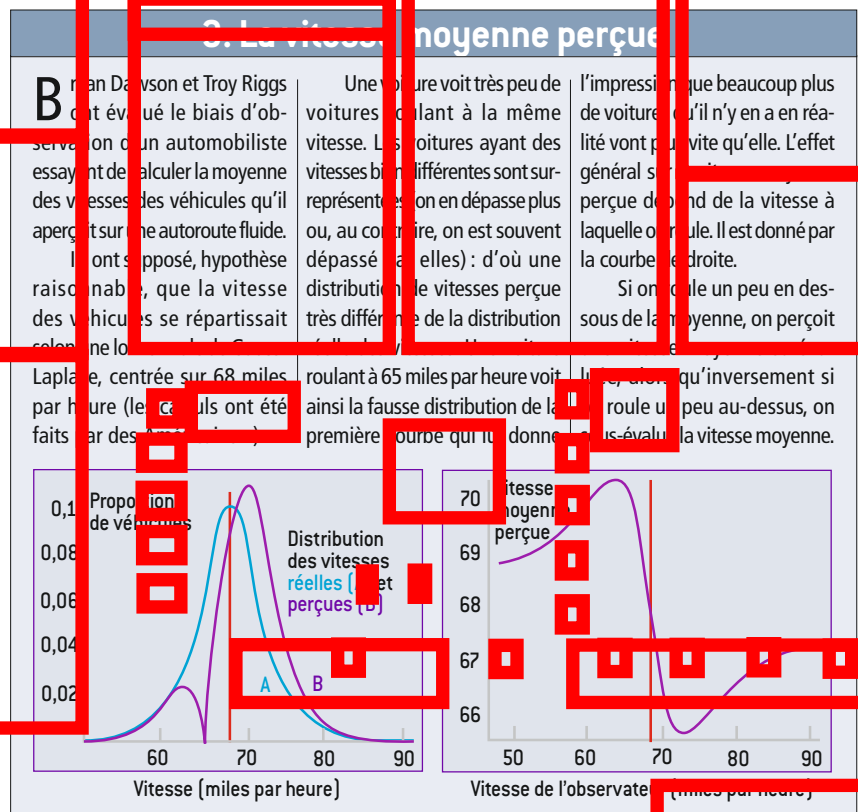
Tout semble clair et bien cohérent puisque les expériences avec des films de

simulations informatiques, et les calculs mathématiques aboutissent aux mêmes conclusions dans le cas des embouteillages.

Malheureusement, les problèmes d'évaluation probabilistes présentent d'autres pièges. Dans le cas d'une autoroute avec plusieurs voies de circulation roulant à des vitesses moyennes différentes.

Les conclusions que nous avons obtenues dans le cas des embouteillages l'ont été sous l'hypothèse que les files ont en moyenne des vitesses égales. Bien sûr, dans la réalité, ce n'est pas toujours le cas. Il existe une multitude de raisons conduisant deux files d'autoroute ou de périphérique à avoir des vitesses différentes. Un accident sur l'une des voies, une bretelle d'entrée quelques centaines de mètres en avant, la suppression d'une des voies due à un rétrécissement, un conducteur excessivement prudent et timoré qui ralentit tous ceux qui le suivent, une file réservée aux

Tout cela conduit à la mise en place de



## 4. Le paradoxe des files lentes et rapides

Une section d'autoroute d'une longueur de 18 km possède deux voies : la L et la R. À cause de trous dans la chaussée, la file de la voie L est lente et la voie R est rapide. Les voitures n'ont pas le droit de changer de file sur cette section.

La voie L avance à 18 km/h (5 m/s). Les voitures sur la voie L sont séparées de 5 mètres et donc, en un point donné de la voie L, il passe une voiture chaque seconde. Une voiture engagée sur L y reste une heure.

À la moitié de la section. À chaque instant, il y a 3 600 voitures sur la voie L et 1 800 sur la voie R.

La voie R avance à 72 km/h (20 m/s). Les voitures sur la voie R sont espacées de 10 mètres et donc, en un point donné de la voie R, il passe deux voitures par seconde.

Une voiture engagée sur R y reste 15 minutes. À chaque instant, il y a 1 800 voitures sur la voie R. Une voiture sur la voie R passe la section en deux secondes. Une voiture sur la voie L est doublée trois fois toutes les deux secondes.

Je suis dans une voiture lente et je suis celui qui est dans une voiture rapide. Quelle est la probabilité  $P_1$  que je sois celui qui est dans une voiture lente, au point donné ?

bilité  $P_2$  que je sois celui qui est dans une voiture rapide, au point donné ?

### Raisonnement 1

À chaque dépassement, il y a une voiture lente et une voiture rapide qui dépassent : j'ai donc autant de chance d'être dans l'une ou l'autre. La réponse est  $P_1 = P_2 = 1/2$ .

### Raisonnement 2

Sur les 18 kilomètres de la section d'autoroute, il y a 3 600 voitures lentes et 1 800 voitures rapides.

Si je suis dans une voiture lente, au point donné, j'ai une chance sur trois d'être dans une voiture rapide. Si je suis dans une voiture rapide, au point donné, j'ai une chance sur deux d'être dans une voiture lente.

prochain dépassement, je suis dans une voiture rapide, je dépasserai. Les réponses sont donc  $P_1 = 1/3$  et  $P_2 = 2/3$ .

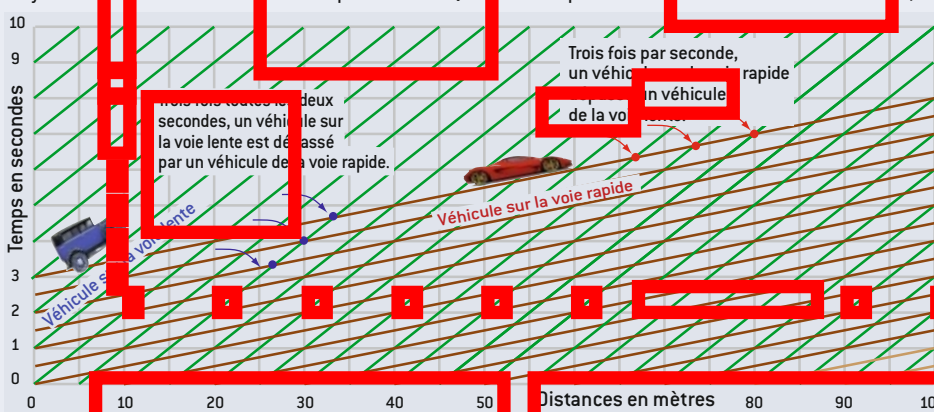
### Raisonnement 3

À l'entrée de la section, il passe une voiture lente par seconde, et deux voitures rapides par seconde (c'est le cas en fait en chaque point du tronçon). En me présentant à l'entrée de l'autoroute, si je ne sais pas quelle est la voie rapide et la voie lente, les voitures se disposent au hasard, je serai 2 fois plus souvent sur la voie rapide que sur la voie lente (elle absorbe deux fois moins de véhicules).

Quand j'emprunte cette section d'autoroute, je suis donc deux fois sur trois dans une voiture qui dépasse et une fois sur trois dans une voiture qui est dépassée. Les réponses sont donc  $P_1 = 2/3$  et  $P_2 = 1/3$ .

C'est amusant ! les trois calculs parfaitement rigoureux aboutissent à trois conclusions différentes ! Comment s'en sortir ?

La solution du paradoxe est donnée dans le texte principal.)



avance réellement moins vite que sa ou ses voisines. Si vous êtes pris dans une telle file, il devient rationnel d'en changer. L'illusion de la file lente existe, oui, mais les vraies files lentes aussi !

La situation créée par ces files avançant à des vitesses différentes est délicate à traiter du point de vue des statistiques. Plusieurs effets de sélection et de perspective s'y produisent et perturbent les évaluations des probabilités quand nous voulons répondre à la question : ai-je de la chance, oui ou non ?

Il y a trois raisonnements possibles (voir la figure 4). Le premier est qu'à chaque dépassement, il y a une voiture dépassée et une voiture qui dépasse. Quand il y a un dépassement, j'ai donc une chance sur deux d'être dépassé ou de dépasser.

Le deuxième raisonnement est que la file lente avance plus vite, les véhicules y seront

plus espacés que dans la file lente où les voitures s'agglomèrent. Sur la section d'autoroute, il y aura donc plus de voitures dans la file lente que dans la file rapide et en moyenne nous nous trouverons plus fréquemment dans la file lente (dont l'effectif est plus grand) que dans la file rapide (comportant moins de véhicules). Si toutes les files ne vont pas à la même vitesse, le sentiment de ne pas avoir de chance est donc fondé objectivement : d'après ce deuxième raisonnement, on se retrouvera vraiment plus souvent dans la mauvaise file. Remarquons que cette conclusion contredit la conclusion du premier raisonnement... mais ce n'est pas fini.

Un troisième raisonnement est encore possible. Les files rapides, même si les véhicules y sont moins serrés, ont des débits plus importants que les files lentes (souvent presque immobilisées) : il y passe un

plus grand nombre de voitures par seconde, car elles ne se gênent pas mutuellement (un bouchon diminue le débit de voitures). Il en résulte que parmi toutes les voitures qui s'engagent dans une section où il y a une file lente et une file rapide et que personne ne change de file, il y a plus de voitures qui empruntent la file rapide que de voitures qui empruntent la file lente. Celui qui, à l'entrée de la section, choisit au hasard une file se trouvera plus fréquemment dans la file rapide que dans la file lente.

Trois raisonnements donnent trois conclusions différentes ! Sur la figure 4, avec des chiffres précis, la probabilité d'être dans la file rapide est égale, selon les raisonnements, à 1/2, 1/3 ou 2/3, ce qui bien sûr est paradoxal. Comment s'en sortir ?

La situation est analogue à celle du paradoxe de Bertrand où l'on interroge sur la pro-

tabilité que la longueur d'une corde tirée au hasard sur un cercle soit plus longue que le côté du triangle équilatéral inscrit dans le cercle (voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe\\_de\\_Bertrand](http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_de_Bertrand)).

Les trois raisonnements calculent trois probabilités qui, contrairement aux apparences, ne correspondent pas à la même question. En effet, il n'est pas équivalent :

- de choisir au hasard une voiture en train d'être dépassée ou de dépasser (raisonnement 1) ;

- de choisir une voiture au hasard à un instant donné sur la section d'autoroute et de s'interroger pour savoir si, lors du prochain dépassement, elle dépassera ou sera dépassée (raisonnement 2) ;

Et ces deux questions sont différentes de celle que l'on se pose avant d'arriver sur la section d'autoroute : vais-je avoir de la chance et ne retrouver sur la voie rapide ? (raisonnement 3).

## Se poser la bonne question

Sachant cela, le problème devient : quelle question le conducteur doit-il se poser pour savoir s'il a de la chance ou pas ? Il me semble que c'est la troisième question, celle qui aboutit à la réponse la plus positive nous indiquant qu'on sera dans la bonne file plus d'une fois sur deux.

Cette conclusion semble contraire au sentiment de malchance persistante ressentie dans les embouteillages, mais l'explication de ce sentiment est simple et nous ramène à la première partie de l'article. Pour les raisons identifiées quand les files ont des vitesses équivalentes, nous croyons avoir moins de chances que nous devrions en avoir. Lorsque les files ont des vitesses différentes, les mêmes biais de mémorisation se produisent pour des raisons de même nature, et pour une raison supplémentaire qui n'a pas encore été évoquée. Quand nous sommes sur la voie la plus rapide, nous en sortons vite et oublions aussitôt que nous venons d'avoir de la chance !

En clair, et dans notre vie à propos de bien d'autres choses que les encombrements de circulation, nous considérons normal d'avoir de la chance et nous ne nous en

réjouissons pas comme nous le devrions (ce qui, les probabilités nous permettent d'analyser, alors que nous trouvons injustes les désagréments qu'un peu de malchance provoque et cela surtout lorsque le désagrément est plus long que la satisfaction).

## Changer de file ?

La réponse est assez claire, ce qui ne veut pas dire facile à appliquer.

- Si vous pensez que la file d'à côté avance plus vite que la vôtre, effectuez un contrôle aussi objectif que possible de votre jugement (il se peut que vous soyez victime de l'illusion de la file voisine) ;

- Si vous concluez que la file voisine est vraiment meilleure, alors il sera intéressant de changer de file.

Cependant, n'oubliez pas que vous prenez un risque d'accident en changeant de file et qu'il faut l'intégrer à votre calcul. Cette prise en compte pourrait en effet en changer la conclusion, comme le montre une étude récente de D. Redelmeier (décidément si précieux de circulation routière).

Les résultats publiés dans la revue *Medical Decision Making* sont troublants, ils résultent de calculs menés à partir des statistiques de mortalité dans les accidents et des données de circulations routières. Ils indiquent que :

- une heure passée à conduire une voiture diminue l'espérance de vie de 20 minutes (du fait qu'on prend un risque d'accident mortel) ;

- une augmentation de vitesse d'un kilomètre par heure entraîne pour un conducteur moyen, une perte de temps de 26 secondes, car le gain de temps obtenu par la vitesse accrue est plus que compensé par la diminution d'espérance de vie résultant de l'augmentation du risque d'accident.

- une diminution de vitesse de trois kilomètres par heure est ce qui produit pour le conducteur moyen le meilleur gain de temps total (différence entre le temps perdu immédiatement par la vitesse moindre, et la prolongation de l'espérance de vie due à la diminution du risque d'accident pour celui qui ralentit). Des calculs à méditer, là encore !

## L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIIL).

## BIBLIOGRAPHIE

P. Barthélémy, L'autre file avance-t-elle vraiment plus vite ?, *Le Monde*, 19 novembre 2011.

D. Redelmeier et A. Doucette, Time lost by driving fast in the United States, *Medical Decision Making*, vol. 30(3), pp. E12-E19, 2010.

B. Dawson et J. D. B. Highway reactivity, *The College Mathematics Journal*, vol. 35(4), pp. 246-251, 2004.

L. Clevenson et al., The average speed on the highway, *The College Mathematics Journal*, vol. 32(3), pp. 169-171, 2001.

D. Redelmeier et D. Tibshirani, Are those other drivers really going faster ? *Chance*, vol. 13(3), pp. 8-14, 2000.

N. Bostrom, Cars in the next lane really do go faster, *Plus*, nov. 2001 (<http://plus.maths.org/content/os/issue17/features/traffic/index>).

D. Redelmeier et R. Tibshirani, Why cars in the next lane seem to go faster ? *Nature*, vol. 401, p. 35, 1999.

## IDÉES DE PHYSIQUE

# Le repassage, c'est physique

*Pour bien faire disparaître les plis formés dans un tissu, il faut le repasser en l'humidifiant. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi.*

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

Comment se débarrasser des plis de nos vêtements ? En les repassant avec une « centrale à vapeur », dont la haute pression permet à la vapeur de pénétrer et d'hydrater les fibres des tissus ? En fait, le repassage fait intervenir à la fois la température, la pression exercée par le fer et l'humidité. Et des physiciens français viennent de donner un nouvel éclairage sur la question. Contrairement à une idée répandue, l'action de l'humidité dans le repassage ne se limite pas à altérer les propriétés mécaniques des fibres : elle crée aussi des ponts liquides entre les fibres, ce qui facilite l'effacement du pli.

Les vêtements portés ondulent et plient au gré de nos mouvements. Le plus souvent, une simple pression de la main suffit pour faire disparaître ces plis. Certains, bien plus tenaces, nous obligent à la corvée du repassage. Des trois caractéristiques du fer à repasser ou de sa variante plus perfectionnée, la centrale à vapeur, on comprend bien le rôle du poids de la semelle : une forte contrainte mécanique sur le tissu apla-

nit le pli. Mais comment agissent la température (150 °C recommandés pour la laine, 200 °C pour le coton) et l'humidité du jet de vapeur ? Pour répondre à ces questions, examinons de plus près nos vêtements.

## Molécules d'eau contre liaisons

Les textiles sont élaborés par le tissage de fibres (éventuellement regroupées en fils) de quelques centimètres de long et de quelques dizaines de micromètres de rayon. Les fibres sont des associations de longues chaînes de molécules, des polymères dont l'origine peut être biologique (la cellulose pour le coton, la kératine pour la laine) ou synthétique (le polyéthylène téréphthalate ou PET pour les polyester, les polyamides pour le nylon). Ces chaînes sont résistantes, mais leur association est bien plus fragile : elle est assurée par des liaisons hydrogène, où œuvre une faible attraction entre un atome avide d'électrons, tel l'oxygène ou l'azote, et un atome moins gourmand, tel l'hydrogène d'une molécule voisine.

Lorsque la fibre est étirée, les chaînes moléculaires glissent les unes sur les autres jusqu'à rompre leurs liaisons hydrogène ; la fibre s'allonge, mais les liaisons se reconstituent dès que la contrainte cesse, et la fibre reprend sa forme originelle.

Quel peut être alors le rôle de l'humidité ? Quand on mouille le tissu, on introduit entre les longues chaînes des molécules d'eau, constituées d'un atome d'oxygène et deux d'hydrogène. Ces molécules perturbent l'organisation et défont les anciennes liaisons, ce qui a pour conséquence un rétrécissement des fibres pour les cotons ou la perte de la torsure pour les laines. Devenues moins solitaires, comme lubrifiées par l'eau, les chaînes sont plus libres de répondre à une sollicitation mécanique et de perdre l'organisation responsable du pli disgracieux : le tissu se défroisse.

Une température élevée facilite ces réorganisations. Animés de mouvements erratiques et très rapides, les atomes s'échappent plus facilement de l'attraction de leurs voisins. Par ailleurs, certains travaux suggèrent qu'avec une température plus élevée, les chaînes moléculaires perdent leur rigidité. Ainsi, à la chaleur d'un sèche-linge ou sous le fer, le tissu serait souple et aucun pli ne pourrait subsister. En refroidissant, le tissu retrouverait sa rigidité, avec des fibres conservant la forme qui leur a été imposée par le fer ; un pli permanent se créerait, comme ceux des manches bien repassés.

Ce que nous avons expliqué jusqu'ici ne porte que sur l'intérieur d'une même fibre. Lydéric Bocquet et son équipe, du CNRS et de l'Université Lyon 1, viennent de montrer qu'il faut aussi prendre en compte l'effet de l'humidité sur les contacts entre fibres. Ces physiciens ont comparé deux matériaux



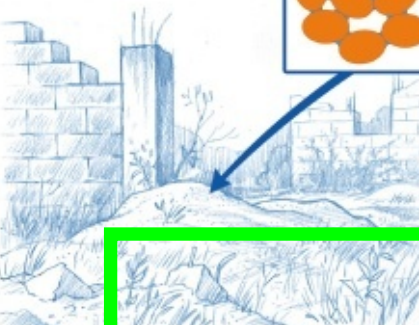
**1. LE REPASSAGE AVEC UN FER À VAPEUR** est beaucoup plus facile qu'avec un fer à l'ancienne. La température élevée et la pression exercée par le fer permettent de briser les liaisons faibles (en bleu) entre les chaînes moléculaires et ainsi de réorganiser ces dernières dans les fibres. Le jet de vapeur facilite ce processus, notamment parce que les molécules d'eau introduites dans les fibres perturbent elles aussi les liaisons entre les chaînes moléculaires.

composés d'un même polymère, le PET, soit sous forme de fibres, du polyester, soit sous forme massive, du mylar. Les plis de feuilles de mylar, matériau qui n'absorbe pas l'eau, sont insensibles à l'humidité. En revanche, bien que les fibres de polyester n'absorbent pas l'eau non plus, la vitesse d'ouverture d'un pli d'un tissu de polyester dépend du taux d'humidité.

## Des ponts lubrifiants

Quel est l'effet de la vapeur d'eau sur le contact entre fibres ? Un phénomène connu depuis longtemps aide à le comprendre. L'observation de tas de sable a montré que le frottement entre grains augmente avec le temps, et cela d'autant plus que le taux d'humidité est important. Ce processus de vieillissement, dans le cas d'une atmosphère sèche, peut atteindre quelques pour cent (en étant patient !). Les physiciens ont pu l'interpréter en termes d'écrasement progressif et lent des aspérités qui assurent le contact mécanique et qui, à cause de la charge exercée sur elles, deviennent plastiques, déformées irréversiblement.

Cependant, l'humidité intervient aussi dans le vieillissement des tas de sable. On sait qu'à température donnée, la masse de vapeur d'eau que l'air peut contenir est



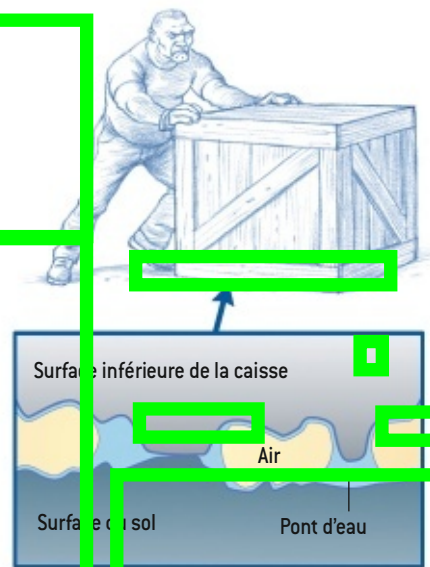
**2. UN VIEUX TAS DE SABLE** est moins fragile qu'un tas tout frais. En effet, avec le temps, des ponts d'eau liquide se forment entre les grains, par condensation de l'humidité de l'air. Ces ponts capillaires augmentent la cohésion des grains. Il en est de même avec les fibres d'un tissu ; mais quand les ponts d'eau deviennent très nombreux et grossissent, ils produisent un effet de lubrification, qui facilite le glissement.

limitée. Au-delà de ce seuil (qui définit les 100 pour cent d'humidité), la vapeur se condense. En deçà du seuil, les gouttes d'eau microscopiques qui peuvent se former au hasard dans cette vapeur n'atteignent jamais la taille qui leur permettrait de grandir : elles s'évaporent en permanence.

Or le confinement de la vapeur entre deux solides modifie radicalement ce phénomène. D'une part, certains matériaux ont une affinité pour l'eau et facilitent ainsi l'apparition d'un film liquide sur leur surface, y compris lorsque l'humidité de l'air ambiant est très faible. D'autre part, les surfaces des solides sont souvent rugueuses et présentent des anfractuosités. Ces cavités, par des effets combinant géométrie et thermodynamique, favorisent la formation de gouttes d'eau alors que l'humidité de l'air ambiant est inférieure à 100 pour cent. Plus la cavité est petite, moins la teneur en vapeur d'eau requise pour cette « condensation capillaire » est élevée.

Ainsi, si l'on regarde de plus près, dans un air humide non saturé d'eau, la zone de contact entre deux solides est parsemée de ponts liquides dans les espaces les plus étroits. Ces ponts sont autant de points de colle qui assurent une plus grande adhésion entre les solides, donc une plus grande difficulté à les faire glisser l'un sur l'autre. Plus le temps passe, plus ces ponts sont nombreux. On a ainsi un vieillissement, au cours duquel l'adhésion entre les solides augmente. C'est ce qui explique qu'un vieux tas de sable est en général plus solide qu'un tas de sable qui vient d'être créé.

Avec les fibres d'un tissu, la vapeur d'eau se comporte de façon analogue. La multiplication des ponts liquides entre les fibres augmente, dans un premier temps, l'adhésion entre fibres. Mais grâce au jet de vapeur du fer à repasser, les ponts liquides deviennent si petits et si nombreux qu'ils finissent par lubrifier le contact entre les fibres, lesquelles peuvent alors glisser facilement l'une sur l'autre. Cet effet, ajouté à l'action de l'eau sur les chaînes moléculaires ainsi qu'aux effets de la température et de la pression mécanique du fer, permet de repasser sans trop d'efforts !



**3. PLUS LA ZONE DE CONTACT** entre deux solides présente des ponts d'eau formés par condensation capillaire, plus le frottement entre les deux surfaces est réduit. Une telle lubrification est à l'œuvre quand on repasse avec un jet de vapeur : de l'eau se condense entre les fibres textiles et lubrifie leurs contacts.

## LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

## BIBLIOGRAPHIE

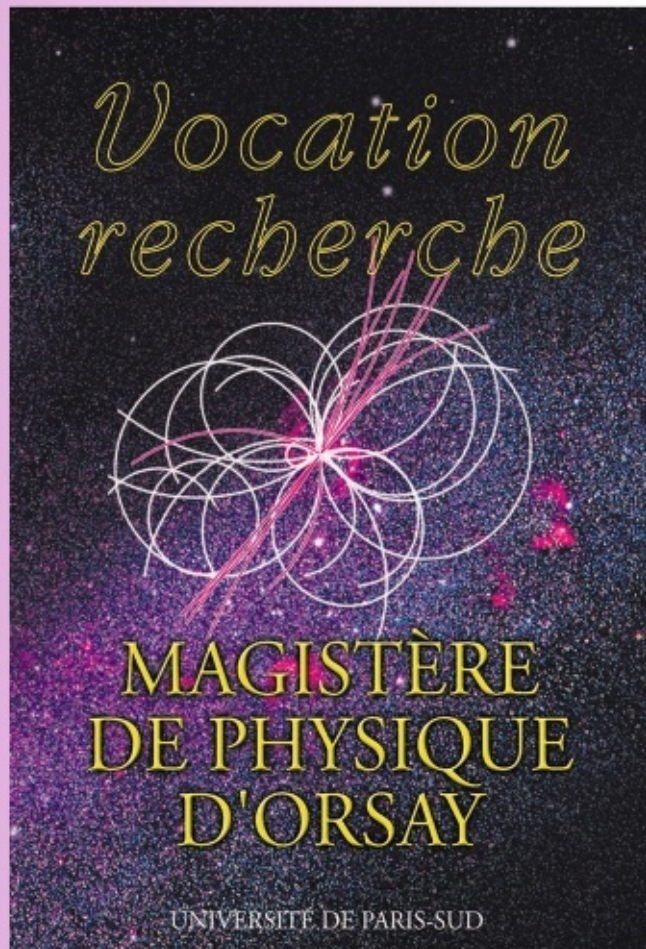
A. Benusi et al., The anatomy of a process from folding to ironing, *Soft Matter*, vol. 8, pp. 3342-3357, 2012.

L. Bocquet et al., Moisture-induced ageing in granular media and the kinetics of capillary condensation, *Nature*, vol. 396, pp. 735-737, 1998.



Retrouvez les articles de M. Courty et E. Kierlik sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

# MAGISTÈRE de PHYSIQUE FONDAMENTALE d'ORSAY



RECHERCHE  
ENSEIGNEMENT  
INDUSTRIE

<http://www.magistere.u-psud.fr/>  
[magistere-physique.sciences@u-psud.fr](mailto:magistere-physique.sciences@u-psud.fr)  
Tél : 01 69 15 58 52

- Une formation complète et approfondie à la recherche et par la recherche en physique incluant les diplômes nationaux de Licence et Master
- Un large choix d'options permettant un parcours personnalisé : tous les secteurs de la physique fondamentale et appliquée, mais aussi la physique médicale, le génie nucléaire, la biophysique, la géophysique, l'électronique, l'informatique, ...
- Une préparation spécifique à l'AGREGATION de physique
- Une possibilité d'intégrer sur titre les meilleures Ecoles d'Ingénieurs
- Une très large ouverture internationale

## SCIENCE &amp; GASTRONOMIE

## Grillons les grillons !

Un jour prochain, il faudra nourrir les neuf milliards d'habitants de la planète. Les insectes seraient une intéressante source de protéines.

Hervé This

Les milieux agronomiques s'interrogent : la croissance de la population mondiale et, aussi, l'accès progressif de grands groupes humains (Chine, Inde) à une alimentation plus proche de la nôtre posent à l'humanité des problèmes majeurs. Comment produire en quantités suffisantes des aliments de qualité, nutritionnellement équilibrés ? Dans cette quête, les entomologistes ont des propositions.

*Si vis pacem para bellum* : les économistes ayant démontré que l'humanité se prépare à une demande alimentaire accrue, les agronomes s'inquiètent depuis longtemps de la productivité des espèces végétales. Ils voient notamment dans les plantes génétiquement modifiées des possibilités de réponse à la question, sans accroître trop l'apport d'« inputs » (engrais, notamment) qui pourraient déséquilibrer les milieux naturels.

Toutefois les plantes ne suffiront peut-être pas à apporter les protéines nécessaires à notre alimentation, ces dernières provenant aujourd'hui en grande partie des tissus animaux. De ce fait, certains cherchent des animaux de meilleure rente, plus prolifiques, plus productifs en protéines. Les nuées de sauterelles qui dévastent certains pays d'Afrique ont donné des idées : ne pourrait-on penser à des élevages de ces insectes ? Lesquels ?

Dans certains pays, la consommation d'insectes est déjà établie. Les populations ont mis au point des techniques de capture et de préparation. Au Mexique, par exemple, la consommation d'insectes comestibles, tels le ver de l'agave (*Aegiale hesperiaris* et *Comadia redtenbacheri*), l'ahuahutle (œufs de *Corixidae* et de *Notonectidae*), des familles de

punaïses aquatiques) ou l'axayacatl (adultes de ces punaises), est traditionnelle. La plupart des espèces sont consommées aux stades immatures (œufs, larves, pupes) et souvent grillées, sur un gril en terre ou directement sur des braises. Mieux, il existe des commerces d'orthoptères dans des pays comme le Japon, la Thaïlande, la Chine, le Cambodge, le Vietnam ou l'Afrique.

Alors que de tels élevages commencent à se développer, les études scientifiques de l'intérêt nutritionnel des insectes apparaissent, à la faveur d'appels d'offres scientifiques. C'est ainsi que Julieta Ramos-Elorduy Blázquez et ses collègues, à l'Université de Mexico, ont comparé la valeur nutritive de 25 espèces d'orthoptères (grillons et sauterelles, criquets) présents dans leur pays (« Could grasshoppers be a nutritive meal », *Food and Nutrition Sciences*, vol. 3, pp. 164-175, 2012).

Selon les espèces, la teneur en protéines varie de 44 à 77 pour cent, et la teneur en matières grasses entre 4 et 32 pour cent. La quantité totale d'acides aminés essentiels est supérieure à celle qui avait été établie par l'Organisation mondiale de la santé, et la teneur en certaines vitamines a été établie. Toutes les espèces sont riches en magnésium.

Comment ces valeurs se comparent-elles avec les aliments occidentaux ? Alors que, par kilogramme, les orthoptères apportent entre 3 319 et 3 389 kilojoules, le poulet n'en apporte que 688, le porc 2 948, et le blé 1 397 ! Certes, le contenu en acides aminés n'est pas équilibré, mais l'étude mexicaine montre que ce contenu varie selon les insectes, leur état de développement, le climat, etc., de sorte que des mélanges bien choisis permettraient un meilleur équilibre.



En 1994, une étude montrait que la vente d'orthoptères était promise à un succès tel que le surnom de « marché millionnaire » a été avancé. Ce qui est certain, c'est que les insectes sont innombrables, et que la consommation de ces derniers serait aussi un moyen de lutter contre les ravages qu'ils occasionnent aux cultures.

Comment les accommoder ? La grillade traditionnelle ne valorise que la partie protéique, et on se souviendra des réactions de Maillard qui, par combinaisons des sucres réducteurs (glucose, abondant dans ces insectes) et acides aminés, conduisent à de nombreux composés qui donnent de la couleur et du goût. Toutefois, on n'oubliera pas, également, que les cuticules d'insectes sont des sources de chitoses (la « chitine ») qui, pyrolysés, engendrent des composés merveilleux... à l'origine du goût des bisques de crustacés ! La recette est facile à transposer : avoir séparé la chair des cuticules, griller ces dernières dans une casserole avec un peu d'huile, puis ajoutez de l'eau, une garniture aromatique, et chauffez à couvert pendant quelques dizaines de minutes, afin d'extraire en solution aqueuse les composés formés. Filtrez, servez, dégustez...



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech

et directeur scientifique de la Fondation Sciences & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur [www.purlascience.fr](http://www.purlascience.fr)

## → BIOLOGIE

### Les mondes nouveaux de la biologie

François Gros

Odile Jacob, 2012  
(253 pages, 24,90 euros).

Qu'est-ce que la biologie ? Comment s'est-elle progressivement structurée ? Quelles ont été les étapes marquantes de son évolution ? Depuis son « invention » par Lamarck au début du XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'aux découvertes de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les progrès ont été décisifs. L'apport de la physique et de ses outils appliqués à l'analyse des macromolécules et au rôle des protéines a permis d'élucider la structure de l'ADN. Cette étape cruciale marque l'avènement de l'exploration moléculaire et de l'extraordinaire essor actuel des connaissances sur l'origine, la complexité et l'organisation du vivant à travers le fonctionnement du génome et de ses mécanismes de régulation.

Membre de l'Académie des sciences, François Gros, professeur honoraire du Collège de France, a consacré sa carrière à la mise en évidence du rôle des ARN dans l'expression génique. C'est cette ex-

ceptionnelle expérience qu'il nous fait partager dans cet ouvrage. Véritable bible de la biologie, il explique en termes simples la complexité de la biologie moléculaire et du génie génétique, qui remettent en cause les paradigmes concernant les rôles respectifs de l'ADN et de l'ARN. Il nous ouvre ainsi les horizons de la post-génomique et des possibilités qu'elle offre aujourd'hui de synthétiser des molécules artificielles, voire de remplacer des séquences entières du génome naturel par du génome artificiel.

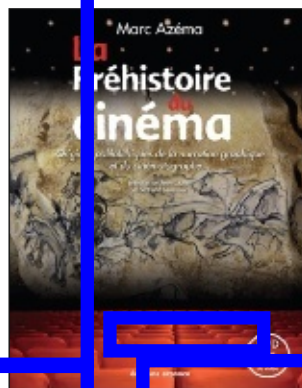
L'évolution de la « biologie synthétique » ne manque pas de soulever de nombreux problèmes éthiques. La prudence s'impose face aux conséquences potentielles de cette recherche : des voix s'élèvent d'ailleurs pour dénoncer une dérive eugénique des Prométhées des temps modernes (les *Playing God*). Mais pour l'auteur, la poursuite de ces recherches s'impose. Toutefois, conscient du risque, il rappelle les instances publiques et la communauté scientifique internationale à édicter des règles de bonne conduite.

Car au-delà d'une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition et de transmission de nombreuses maladies, les récents progrès de la génétique trouvent leur légitimité dans l'exploitation d'un potentiel thérapeutique extraordinaire, que ce soit dans le domaine de la thérapie génique ou dans celui de la « chirurgie du gène » permettant d'intervenir au cœur même de l'ADN.

La logique du vivant s'impose ainsi à nous dans sa remarquable subtilité, et c'est tout à l'honneur du grand chercheur qu'est F. Gros que de nous guider si bien à travers les méandres de la quête scientifique biologique.

→ Bernard Schmitt

CERNh - Lorient



## → PRÉHISTOIRE

### La préhistoire du cinéma

Marc Azéma

Errance, 2012  
(293 pages, 39 euros).

L'archéologue annonce le premier mouvement du cinéma. L'auteur démontre cette thèse par l'analyse des images laissées par les hommes préhistoriques.

Le lecteur est entraîné dans un passionnant voyage sur les traces de l'évolution des images narratives et picturales. Il passe par les trois grandes étapes de cette évolution : la genèse (au Paléolithique), la gestation (du Mésolithique à l'invention de la bande dessinée), la naissance du cinéma (du reste, dans sa préface, Bertrand Tavernier souligne qu'en remontant aux origines paléolithiques de la narration graphique, Marc Azéma réussit à envisager la préhistoire du cinéma.

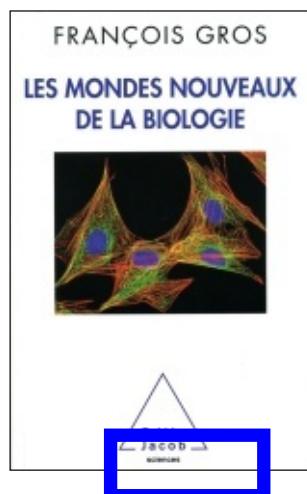
Il apporte par là véritablement du neuf dans l'analyse de l'art préhistorique. En effet, si les théories intéressantes qui en interprètent le sens sont nombreuses, aucune d'entre elles ne peut être définitive. La seule certitude concerne les tentatives répétées des artistes de représenter le mouvement, que l'auteur relève dans 40 pour cent des images préhistoriques. On com-

prend pour quoi : pour l'essentiel, ces images montrent des animaux (du latin *anima*, signifiant à la fois « esprit », mais aussi « principe vital »), ce qui n'étonne pas, car les hommes préhistoriques vivaient des animaux et en connaissaient les moindres mouvements.

Leurs tentatives pour animer... les animaux qu'ils représentent peuvent être discrètes : une seule partie du corps est concernée – ou spectaculaires – plusieurs parties du corps sont montrées, voire plusieurs individus. Le corpus présenté révèle en outre que certaines conventions gra-

phiques utilisées aujourd'hui étaient déjà en place durant la Préhistoire. J'en donnerai deux exemples parmi les plus banals pour un historien de l'art : l'emploi de la convention dite du « galop volant », qui consiste en une extension des membres du quadrupède sans rapport avec la réalité, mais suggérant efficacement la course ; l'emploi de la *synecdoque* (une partie du corps pour le mouvement pour exprimer le mouvement du corps tout entier) : ainsi, on perçoit la tension d'une tête indiquant le mouvement de l'avant ou encore l'impression très perceptible de vent dans une chevelure...

Remarquons par ailleurs que les actions représentées forment des séquences, donc des « scènes » composées appelant une « mise en scène ». À cet égard, le rôle joué par la lumière est essentiel. Figées sur les parois de la caverne, les figures s'animent littéralement sous l'effet de la lueur vacillante d'une torche... Et s'il en faut plus pour être édifié par la thèse de M. Azéma, la sidérante découverte de poêlles, manifestement de petits objets optiques conçus pour donner une impression de mouvement une fois mis en rotation, suffira. Plus tard, au XIX<sup>e</sup> siècle, on les nommera *ta-*



matropes. Décidément, les artistes préhistoriques avaient le mouvement dans l'œil.

→ Marie-Josée Buggé

Éditions des Mèliès

## → PHYSIQUE

### Et si le temps n'existe pas ?

Carlo Rovelli

Dunod, 2012

(150 pages, 21 euros)

Conçu pour les jeunes, cet ouvrage propose de l'évolution des idées sur l'espace et le temps intéressera aussi les moins jeunes et ceux qui sont peu familiers avec la physique.

D'Aristote jusqu'à Newton, l'espace apparaît comme une structure formée par les objets du monde. Ce n'est pas une entité, mais une relation entre des objets. Newton impose une autre conception : l'espace est une entité qui peut exister même quand rien d'autre n'existe ; c'est une espèce de grande boîte, fixe, rigide, sans direction privilégiée, indépendante des objets qui s'y meuvent. Cette conception reste aujourd'hui celle du sens commun. Mais, pour les physiciens

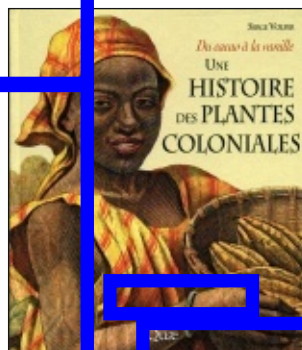
postérieurs à Einstein, l'espace est un champ gravitationnel, donc un objet physique qui bouge, ondule, se courbe, et que des équations régissent, comparables aux équations de l'électromagnétisme.

La notion de temps subit aussi des avatars. Pour Newton, le temps est abstrait et absolu. Pour Einstein, il est local, parce que le champ gravitationnel influe dessus. Chaque objet dans l'Univers possède son propre temps. Il ne faut donc plus parler d'espace et de temps, comme s'ils étaient séparés, mais d'espace-temps.

La théorie quantique et la relativité insistent, chacune, des notions qui l'autre contredit. L'espoir de résoudre cette difficulté majeure de la physique actuelle a mené Carlo Rovelli à une révision radicale des notions d'espace et de temps : ceux-ci n'existent pas ! Il est coauteur d'une théorie de la gravitation à l'échelle quantique, la « théorie des boucles ». Les boucles sont les lignes du champ gravitationnel quantique. Elles ne sont pas dans l'espace : elles sont l'espace. En l'absence de masse, elles restent fermées. En présence d'une masse, elles s'ouvrent. Il n'y a plus d'espace, donc plus de temps ; il n'y a que des particules, des champs et des boucles de champ gravitationnel, le tout en interaction. Expliquer par les mathématiques comment notre perception du temps, à l'échelle macroscopique, émerge d'un monde quantique dépourvu de temps est concevable.

Il faudra longtemps sans doute avant qu'on puisse tester la théorie des boucles, aussi spéculative, mais moins connue, que la théorie des cordes. Quoi qu'il en soit, C. Rovelli a fait admirablement dégager les idées de leur langage technique, et offrir au lecteur un plaisir d'intelligence.

→ Didier Nordon



→ NOMINOM

### Une histoire des plantes coloniales

Serge Valleron

Quæd, 2012

(141 pages, 26,40 euros).

Dans une superbe présentation, ce livre nous invite à découvrir les saveurs exotiques d'un voyage botanique ancré au cœur d'une époque et d'un continent : l'Afrique coloniale.

Les plantes ont toujours voyagé avec les hommes. Elles sont l'objet d'enjeux considérables. Volées, données échangées, elles ont ainsi migré entre le continent américain, l'Europe, l'Asie et l'Afrique dans un incessant chassé-croisé maritime. Afin de satisfaire une demande européenne toujours plus forte, notamment en canne à sucre et en coton, l'idée s'impose, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, de s'affranchir de la dépendance économique des Amériques. Pour les puissances européennes, l'enjeu est considérable : commercer, produire elles-mêmes ces plantes tropicales afin de conquérir une autonomie d'approvisionnement. Des entrées spéculatives devenues essentielles à leur économie ? C'est ce qui conduit la France à élargir son empire colonial en Afrique. L'essor de ces cultures se trouve ainsi étroitement lié avec l'extension des conquêtes africaines.

Derrière le discours officiel de la mission civilisatrice se cache

## Brève

### LES DÉCISIONS ABSURDES

Christian Morlaix

Gallimard, 2012

(284 pages, 19,50 euros).

Comment éviter les décisions absurdes ? Issu de l'industrie, l'auteur passe en revue les expériences accumulées en chirurgie, dans l'aviation, chez les militaires, en montagne, ... pour mettre en évidence les sources d'aberration et les règles favorables aux décisions hautement fiables. Élaborées dans les domaines de l'aviation, ces règles s'appliquent-elles aussi dans la pensée ? Sans doute, car penser peut être une forme d'agir.

### POURQUOI JE N'AI PAS INVENTÉ LA ROUE

Michel Raymond

Odile Jacob, 2012

(200 pages, 20 euros).

Quels sont les effets de la sélection naturelle ? L'auteur nous apprend à raisonner pour les identifier et comprendre leur origine. Lumineux, son propos est fondé sur l'exemple. Il culmine quand il explique à quel point il est souhaitable que l'opposition nature-culture, typique du XX<sup>e</sup> siècle, soit maintenue au XXI<sup>e</sup> siècle pour que nous devenions enfin évolutives les pressions sélectives dues à nos traits culturels.

### NOM DE LIEUX CELTIQUES DE L'EUROPE ANCIENNE

Xavier Delamarre

Errance, 2012

(384 pages, 30 euros).

Vienne, Paris, Milan... On trouve des toponymes celtiques de la Grande-Bretagne à Roumanie. En voici un premier corpus européen, même si la France y est plus détaillée. Très facile d'emploi, cet ouvrage, qui sera payé par ordre alphabétique rendra service aux archéologues et ravira les passionnés d'étymologie ou de toponymie.



## AMBROISE PARÉ UNE VIVE MÉMOIRE

Eveline Benoit-Salvadore (dir.)  
De Boeck, 2012  
(280 pages, 40 euros).

Entrer dans la vie et l'époque d'Ambroise Paré (1510-1590) par ses voyages, ses récits, son entourage, c'est ce que propose ce recueil rassemblant articles parus entre 1985 et 2001 et études inédites. Par petites touches, le père de la chirurgie française devient un personnage vivant, du jeune homme à l'homme d'État, des horreurs de la guerre au chirurgien confirmé relatant avec soin l'histoire de ses patients.

## FIN(S) DE VIE LE DÉBAT

Jean-Marc Ferry (coord.)  
PUF, 2012  
(515 pages, 15 euros).

Dans les décisions prises au fil de l'évolution d'une maladie, quelle est la part des soignants et quelle est celle du malade ? Qui décide de la mort d'une personne en fin de vie ? Dans un style clair et accessible, des anthropologues, praticiens hospitaliers, philosophes et juristes apportent leurs points de vue sur ces questions. Une fois de plus, les partisans et détracteurs de l'euthanasie invoquent souvent la dignité humaine. Qu'entend-on aujourd'hui par ce terme ?

## LE NUCLÉAIRE EXPLIQUÉ PAR DES PHYSICIENS

Bernard Bonin (coord.)  
Éditions Sciences, 2012  
(200 pages, 20 euros).

Des chercheurs du CEA proposent dans cet ouvrage pédagogique un panorama complet de la filière nucléaire, des principes physiques aux enjeux économiques, aux risques et à la durabilité. Un document utile pour comprendre les enjeux du débat énergétique.

une réalité plus cynique : la nécessité de plus en plus pressante d'affirmer sa puissance et d'assurer son autonomie en matières premières. Dès lors, la rentabilisation des cultures tropicales s'impose par la sélection des espèces et par la rationalisation.

La création, en 1899 du « Jardin Colonial » à Nogent-sur-Marne, devenu quelques années plus tard « l'École nationale supérieure d'agriculture coloniale » est le point de départ d'une grande aventure humaine et agronomique. Ce centre de formation et de recherche (devenu l'IRSTOM, puis le CIRAD), a été, malgré de nombreux avatars, un foyer efficace de promotion des connaissances et de développement, au plus proche des réalités de terrain. La France a pu ainsi théoriser, puis léguer un remarquable patrimoine de connaissances agronomiques tropicales. S. Voinchet nous invite à partager l'histoire particulière de ces plantes qui ont formé le socle économique des nouveaux États africains. Aujourd'hui l'enjeu essentiel des relations Nord-Sud.

→ Bernard Schmitt  
L'orient

## → COSMOLOGIE

## Les univers parallèles

Tobias Hüter et Max Rauner  
Les Éditions, 2012  
(111 pages, 22 euros).

Les auteurs, tous deux jeunes physiciens, nous proposent un parcours presque sans autorité à travers une multiplicité de spéculations aussi hardies que complexes.

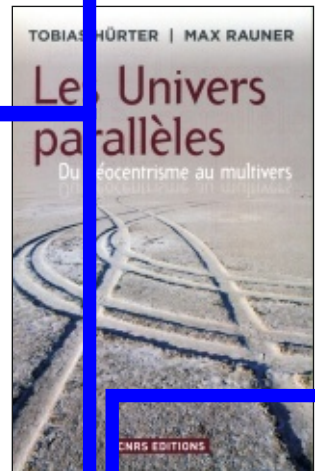
Ils nous rappellent d'abord que Démocrite avait déjà conçu

dans le vide, auraient pu se rassembler en endroits pour constituer une multitude de mondes différents, dont le nôtre. Deux mille ans plus tard, une thèse analogue vaudra à Giordano Bruno d'être brûlé en cendres.

Qu'en est-il au-delà de l'univers visible, au-delà de cet horizon que nous voyons ? Il y a 13,7 milliards d'années, lors du Big Bang, alors que dans notre « présent » il est déjà beaucoup plus loin, puisque nous nous éloignons de lui comme il s'éloigne de nous ? Si l'espace ne se referme pas sur lui-même, a-t-il d'autres univers à l'extérieur du nôtre, comme le croient nombre de cosmologistes ?

Toutefois, cette séparation spatiale des univers n'exclut pas d'autres types de séparations. Au XVIII<sup>e</sup> siècle le jésuite et philosophe Roger Boscovich écrivait déjà : « Dans le même espace, il pourrait y avoir un grand nombre d'Univers, séparés de manière à être parfaitement indépendants les uns des autres et à ne jamais s'apercevoir de l'existence d'un autre Univers. »

En 1937, le physicien américain Hugh Everett a présenté une telle solution pour un paradoxe bien connu de la mécanique quantique, celui du chat de Schrödinger, où l'on conçoit un dispositif qui aboutit à mettre le chat dans un état où il est à la fois mort et vivant. Everett propose tout simplement qu'alors l'univers où est réalisée l'expérience se scinde en deux versions, une où le chat est mort, l'autre où il est vivant. Comme cette situation très hypothétique du chat est en fait le lot commun d'objets microscopiques, cela veut dire que l'Univers ne cesse de se diviser en versions évolutives différentes : l'univers est



remplacé par un multivers. Après une longue éclipse, cette hypothèse revient en force depuis la fin des années 1980.

Pour ce qui est des univers situés spatialement à l'extérieur du nôtre, des astrophysiciens russes, Andreï Linde et Alexander Vilenkin, supposent qu'en fait, là-bas au loin, des myriades de Big Bangs se produisent en permanence, si bien que l'univers global serait en fait une sorte de mousse de bulles qui éclatent et grossissent, notre petit univers n'étant que l'une de ces bulles. Les lois de la physique ne seraient pas forcément les mêmes partout, mais le nombre des univers serait tel qu'il y en aurait où la vie intelligente est possible...

Quelques philosophes et physiciens suggèrent sinon que tout univers où nous sommes capables de penser existe forcément. Ainsi le philosophe américain David Lewis croit à en croire son collègue Mark Johnson, « penser par exemple qu'il existe un monde avec des ânes qui parlent »...

→ Christophe Pichon  
L'Esprit

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :

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