

POUR LA

Édition française de Scientific American

# SCIENCE

NUMÉRO  
ANNIVERSAIRE

1977 - 2017

ONDES GRAVITATIONNELLES ■ ÉPIGÉNÉTIQUE ■  
MICROBIOTE ■ CLIMAT ■ BOSON DE HIGGS ■ WEB ■  
EXOPLANÈTES ■ VIRUS GÉANTS ■ FULLERÈNES ■  
CELLULES SOUCHES ■ TOUMAÏ ■ APPRENTISSAGE  
PROFOND ■ CRISPR-CAS9 ■ THÉORÈME DE FERMAT ■  
SÉQUENÇAGE DU GÉNOME...

NOVEMBRE 2017  
N° 481



# 40 ANS DE DÉCOUVERTES

40 révolutions  
scientifiques  
racontées par

Cédric Villani  
Étienne Klein  
Jean-Claude Ameisen  
Valérie Masson-Delmotte  
Gérald Bronner...

# ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,  
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines  
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

[www.ademe.fr/theses](http://www.ademe.fr/theses)



**PRESSE ET COMMUNICATION**

Susan Mackie  
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

**PUBLICITÉ France**

stephanie.jullien@pourlascience.fr

**ABONNEMENTS**

**Abonnement en ligne:** <http://boutique.pourlascience.fr>  
**Courriel:** [pourlascience@abopress.fr](mailto:pourlascience@abopress.fr)

Tél.: 03 67 07 98 17

**Adresse postale:** Service des abonnements –  
Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,  
67402 Illkirch Cedex

**Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)**

**France métropolitaine:** 59 euros – Europe: 71 euros  
**Reste du monde:** 85,25 euros

**DIFFUSION**

**Contact kiosques:** À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet  
Tél. 04 88 15 12 41

**Information/modification de service/réassort:**  
[www.direct-editeurs.fr](http://www.direct-editeurs.fr)

**SCIENTIFIC AMERICAN**

**Editor in chief:** Mariette DiChristina

**President:** Dean Sanderson

**Executive Vice President:** Michael Florek

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

**Origine du papier:** Autriche  
**Taux de fibres recyclées:** 30 %  
**«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»:** P<sub>tot</sub> 0,007 kg/tonne



**MAURICE  
MASHAAL**  
Rédacteur  
en chef

## DE L'UTILITÉ D'UN ANNIVERSAIRE

Imaginez ou rappelez-vous un monde où les microordinateurs n'existent pas, où les seuls téléphones que vous pouvez utiliser lors d'un déplacement sont ceux des cabines publiques, où vous ne pouvez régler vos achats qu'en espèces ou par chèque, où l'accès à une information précise ou spécialisée nécessite de consulter une bibliothèque parfois très distante, où la communication avec des amis ou des collègues à l'étranger est lente, laborieuse ou coûteuse... Ce monde appartient à un passé qui n'est pas si lointain: il suffit de remonter à l'an 1 avant la création de *Pour la Science*, soit il y a une quarantaine d'années.

Les mutations intervenues depuis dans les situations que l'on vient d'évoquer relèvent à première vue des techniques, mais que l'on ne s'y trompe pas: ces développements doivent leur existence aux progrès de la science fondamentale et aux activités de ses serviteurs. Pour ne citer qu'un exemple, si les ordinateurs domestiques ont aujourd'hui des disques durs de plusieurs centaines de gigaoctets, et non des mémoires de quelques kilooctets, c'est grâce à des physiciens qui ont découvert l'effet de magnétorésistance géante, en 1988.

Les découvertes réalisées au cours des quarante années passées sont innombrables. Après un choix serré, *Pour la Science* vous en détaille quarante dans ce numéro. Toutes n'ont pas bouleversé la technologie ou la médecine, mais elles ont changé en profondeur l'état de la science: la différence entre ce qu'on sait aujourd'hui et ce qu'on savait dans les années 1970 est vertigineuse. Et dans bien des domaines, il est légitime de parler de révolution. Cet anniversaire des 40 ans de *Pour la Science* permet ainsi de faire une pause dans le maelstrom de l'actualité pour comprendre, avec du recul, ce que les scientifiques ont découvert au cours de ces décennies. Puisse cela nous aider à entrevoir ce que nous réserve le monde de demain – et à réfléchir au monde que nous souhaitons.

# SOMMAIRE

N° 481 /  
Novembre 2017

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- Un pari mathématique rentre dans le rang
- Effet cocktail de perturbateurs endocriniens
- Le cristallin du calmar
- Des gouttes superrapides
- Agitation dans les synapses
- Les prix Nobel 2017

P. 12

### LES LIVRES DU MOIS

P. 13

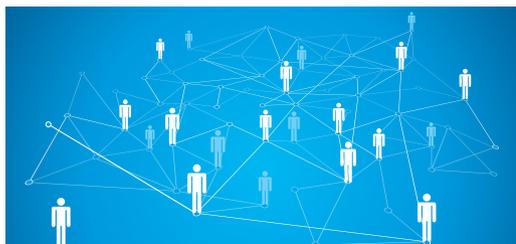
### AGENDA

P. 14

### HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

L'accès au réseau, un droit fondamental?

Gilles Dowek



P. 16

### CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Ce néoanimisme qui vient

Gérald Bronner

# 40 ANS DE



1987 - 1996 P. 38

1977 - 1986 P. 18

P. 20 # 1977  
Premier génome séquencé  
La saga de l'ADN  
Pierre Tambourin

P. 23 # 1977  
Théorème des 4 couleurs  
René Cuillierier

P. 23 # 1978  
La cryptographie à clé publique  
R. C.

P. 24 # 1979  
La théorie des perspectives  
Gérald Bronner

P. 28 # 1980  
L'astéroïde qui extermina les dinosaures  
Eric Buffetaut

P. 30 # 1982  
Intrication quantique  
Alain Aspect

P. 34 # 1983  
Les bosons W et Z  
R. C.

P. 35 # 1983  
L'homéoboîte  
R. C.

P. 35 # 1983  
Le virus du sida identifié  
R. C.

P. 36 # 1985  
Les fullerènes  
Annick Loiseau

P. 40 # 1987  
« L'épigénétique s'est enfin imposée »  
Edith Heard

P. 42 # 1987  
La supraconductivité à haute température  
René Cuillierier

P. 44 # 1990  
L'IRM fonctionnelle dévoile les secrets du cerveau  
Olivier Houdé

P. 48 # 1993  
Le Web, une utopie à défendre  
Serge Abiteboul et Gilles Dowek

P. 50 # 1994  
Le gène BRCA1 et le cancer du sein  
R. C.

P. 51 # 1994  
La grotte Chauvet  
R. C.

P. 52 # 1995  
« Il y a un roman derrière le grand théorème de Fermat »  
Cédric Villani

P. 54 # 1995  
Détection d'exoplanètes  
R. C.

P. 54 # 1995  
Condensats de Bose-Einstein  
R. C.

P. 56 # 1996  
Récepteur Toll: une nouvelle vision de l'immunité  
Jean-Claude Ameisen



POUR LA  
**SCIENCE.FR**

LETTRE D'INFORMATION

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

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

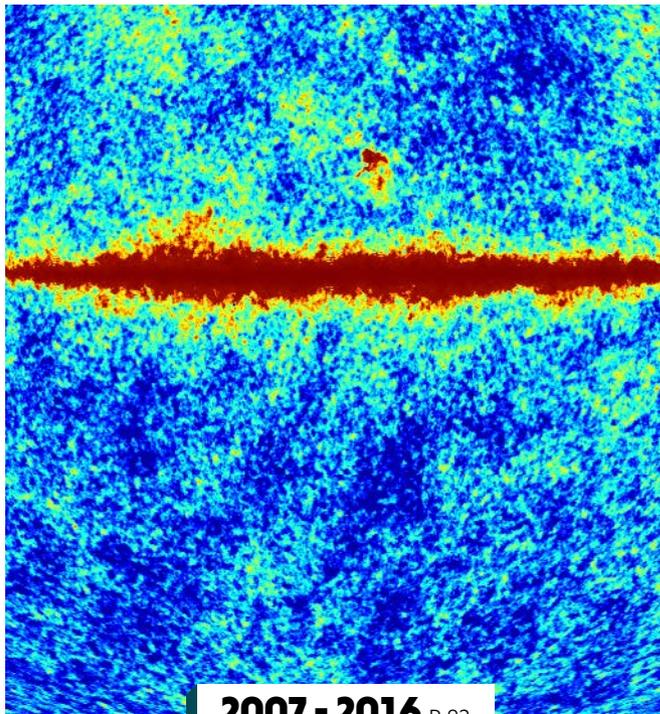
Inscrivez-vous  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

# DÉCOUVERTES

## 1997 - 2006 P.60

- P. 62 # 1998  
**L'interférence à ARN**  
*Jérôme Cavallé*
- P. 64 # 1998  
**« La plasticité est l'essence du cerveau »**  
*Alain Prochiantz*
- P. 68 # 1998  
**La conjecture de Kepler enfin prouvée**  
*René Cuillierier*
- P. 68 # 1998  
**L'oscillation des neutrinos**  
R. C.
- P. 69 # 1999  
**Simulations multiagents pour effets de groupe**  
R. C.
- P. 70 # 2002  
**Toumaï confirme que nous sommes tous des Africains**  
*Michel Brunet*
- P. 74 # 2002  
**La conjecture de Poincaré vaincue**  
*Étienne Ghys*
- P. 76 # 2003  
**Le premier virus géant**  
R. C.
- P. 76 # 2004  
**Un plan de carbone : le graphène**  
R. C.
- P. 78 # 2006  
**Le microbiote, un organe à part entière**  
*Hervé Blottière et Joël Doré*



## 2007 - 2016 P.82

- P. 84 # 2007  
**Des cellules adultes reprogrammées en cellules souches**  
*René Cuillierier*
- P. 85 # 2010  
**Une première cellule artificielle**  
R. C.
- P. 85 # 2011  
**La plume avant le vol**  
R. C.
- P. 86 # 2011  
**Planck sonde les débuts de l'Univers**  
*Étienne Klein*
- P. 90 # 2012  
**Le boson de Higgs**  
*Pierre Fayet*
- P. 92 # 2012  
**CRISPR-Cas9**  
R. C.
- P. 92 # 2013  
**Le génome néandertalien**  
R. C.
- P. 94 # 2013  
**L'humanité modifie le climat**  
*Valérie Masson-Delmotte*
- P. 98 # 2015  
**L'astronomie gravitationnelle est née**  
*Nathalie Deruelle et Jean-Pierre Lasota*
- P. 100 # 2016  
**Apprentissage profond**  
*Yoshua Bengio*
- P. 104  
**Quel âge a vraiment Pour la Science ?**  
*Roland Lehoucq et Sébastien Steyer*



## RENDEZ-VOUS

P. 108

**LOGIQUE & CALCUL**

### COÏNCIDENCES SURPRENANTES, MAIS BANALES

*Jean-Paul Delahaye*

Des erreurs de jugement nous conduisent à voir dans certaines coïncidences des phénomènes incroyables et à leur rechercher d'impossibles explications.

P. 114

**IDÉES DE PHYSIQUE**

### Voir la nuit comme en plein jour

*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*



P. 118

**CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION**

### Le ver, l'escargot et l'amibe

*Hervé Le Guyader*

P. 122

**SCIENCE & GASTRONOMIE**

### Diviser pour mieux se régaler

*Hervé This*

# A

## CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.12 Livres du mois

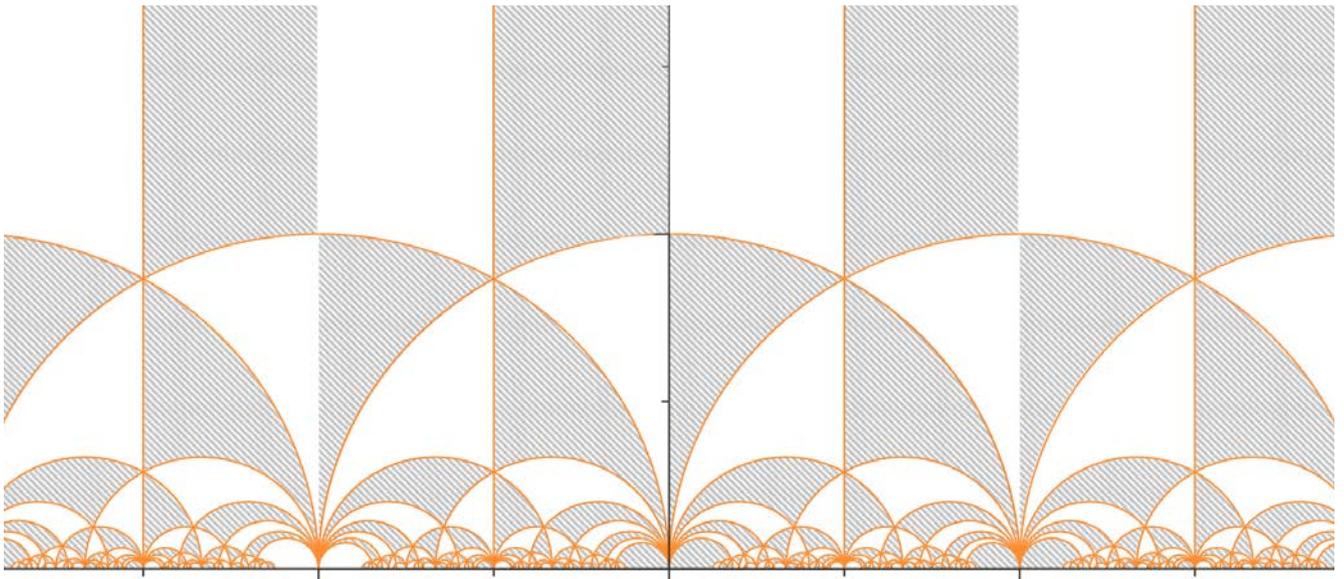
P.13 Agenda

P.14 Homo sapiens informaticus

P.16 Cabinet de curiosités  
sociologiques

# UN PARI MATHÉMATIQUE RENTRE DANS LE RANG

Des mathématiciens ont établi des connexions, nommées *moonshines*, entre un groupe de symétries particulier et d'autres objets mathématiques, des formes modulaires.



**D**errière l'expression *moonshine* se cache une collection de découvertes mathématiques énigmatiques. Ces résultats établissent des relations étonnantes entre des objets *a priori* sans lien issus de domaines mathématiques très éloignés, les groupes finis de symétrie et les formes modulaires. Depuis la découverte du premier *moonshine* en 1979, une vingtaine de ces connexions ont été mises en évidence. Ken Ono, de l'université Emory, à Atlanta, et ses collègues viennent d'en découvrir une d'autant plus spectaculaire qu'elle met en jeu l'un des groupes de symétrie les plus mal connus: le groupe O'Nan, appartenant aux groupes dits parias.

En mathématiques, une symétrie d'un objet est une transformation qui laisse cet objet intact. Les exemples les plus simples de la symétrie sont ceux que l'on rencontre en géométrie à l'école, les rotations ou les symétries axiales. Au XIX<sup>e</sup> siècle, les mathématiciens ont montré que l'on pouvait formaliser ces symétries à partir de la théorie des groupes.

Il existe une grande diversité de groupes de symétrie. Est-il possible de les organiser en familles? En 1972, Daniel Gorenstein, de l'université Harvard, a proposé un programme conjectural destiné à finir la classification des «groupes finis simples». Le résultat de la classification est qu'il existe un nombre restreint de familles de groupes finis simples pouvant être construits systématiquement

Les fonctions modulaires sont définies de manière naturelle sur le «demi-plan de Poincaré», dont la géométrie est non-euclidienne (hyperbolique). Elles présentent des symétries particulières comme celle ci-dessus.

ainsi que 26 autres groupes, ne se rattachant pas à ces familles. Ces 26 groupes, ceux qui nous intéressent ici, sont dits sporadiques. Le plus grand est le «groupe monstre», avec plus de  $10^{53}$  éléments, soit le nombre d'atomes dans la planète Jupiter! Il forme, avec 19 groupes sporadiques qui lui sont liés, la *happy family*. Les 6 derniers sont nommés les groupes parias.

Le groupe monstre est au cœur d'une curieuse découverte. En 1978, John McKay,

à Montréal, a observé une correspondance entre certains nombres particuliers liés au groupe monstre et ceux de la fonction  $J$ , une forme modulaire classique remontant au XIX<sup>e</sup> siècle. Les formes modulaires sont une classe de fonctions qui présentent des symétries particulières (voir la figure ci-contre). Elles sont des objets incontournables de la théorie des nombres et, notamment, sont au cœur de la démonstration du théorème de Fermat par Andrew Wiles.

Que sont les nombres trouvés par John McKay? La fonction  $J$  peut être écrite comme une somme de termes dont chacun est pondéré par un coefficient. Le premier coefficient est 196884. John McKay a reconnu en ce nombre la somme des deux premières dimensions d'espaces dont le groupe monstre est un groupe de symétrie: 1 et 196883.

La plupart des mathématiciens y ont vu une pure coïncidence, mais rapidement, d'autres correspondances numériques ont été mises en évidence. En 1979, John Conway, à Princeton, a qualifié cette connexion improbable de *monstrous moonshine* qui signifie «folie monstrueuse». En 1992, Richard Borcherds a démontré que le *monstrous moonshine* a un fondement bien réel. Ce *moonshine* a longtemps été un cas unique. Mais à partir de 2010, 23 nouveaux *moonshines* ont été découverts. Ils connectent les groupes de la *happy family* à des formes modulaires.

Les groupes parias avaient-ils aussi des *moonshines*? Ken Ono et ses collègues viennent de répondre par l'affirmative. Ils ont montré que le groupe paria O'Nan est lié à un type de formes modulaires différent des précédents *moonshines*. Les trois mathématiciens ont découvert ce *moonshine* de la même façon que John McKay, en notant des correspondances numériques tirées de ces différents objets.

En outre, ces formes modulaires sont aussi connectées à un autre type d'objet central pour la théorie des nombres, les courbes elliptiques. Ainsi, le groupe O'Nan contiendrait de nombreuses informations sur les courbes elliptiques, même si, pour l'instant, la nature des symétries sous-jacentes reste à expliciter. La découverte de Ken Ono et de ses collègues pourrait donc apporter un outil puissant pour mieux étudier ces courbes. ■

SEAN BAILLY

J. F. R. Duncan *et al.*,  
*Nature communications*, vol. 8, n° 670, 2017

## Alerte à l'effet cocktail pendant la grossesse

Alors que les débats se multiplient sur les contaminations de notre environnement, l'équipe de Bernard Jégou, à Rennes, vient d'apporter la preuve d'un effet dit cocktail, dû à un mélange de perturbateurs endocriniens, sur la production de testostérone par les testicules du fœtus humain.



Propos recueillis par NOËLLE GUILLON

**BERNARD JÉGOU**  
directeur de recherche  
à l'Inserm-IRSET  
et à l'EHESP, à Rennes

### Qu'entend-on par effet cocktail de perturbateurs endocriniens ?

En conditions réelles, les organismes sont exposés à de multiples substances chimiques, dans un écosystème très complexe que l'on commence à peine à explorer. Parmi ces composés, les perturbateurs endocriniens sont des molécules capables, notamment, de bloquer la synthèse d'hormones, comme la testostérone. La question du rôle des mélanges s'est posée depuis longtemps. Il avait été montré, chez des espèces animales mais aussi sur des cellules transformées d'origine animale et humaine, que l'exposition simultanée à plusieurs substances exacerbe les effets de chaque molécule individuelle, y compris à des concentrations auxquelles chaque molécule prise une à une n'exerce pas ou peu d'activité. C'est l'« effet cocktail ».

### Qu'a apporté votre approche ?

Il manquait la preuve que cet « effet cocktail » existe aussi chez l'homme. Nous avons utilisé des tissus humains complexes, des testicules fœtaux humains récupérés suite à des IVG, grâce à la collaboration de femmes et de l'équipe médicale du CHU de Rennes. Nous avons exposé ces tissus à une série de molécules individuelles, puis à des cocktails de 4 ou 8 molécules. Nous nous sommes intéressés à une hormone clé, la testostérone, nécessaire à la masculinisation de l'individu et au développement de l'appareil urogénital, ainsi qu'à la croissance du cerveau. Nous avons sélectionné des substances auxquelles les femmes enceintes sont susceptibles d'être exposées : médicaments, pesticides, agents récréatifs tels que le café ou l'alcool. Nous avons ainsi sélectionné 27 molécules. Onze d'entre elles se sont révélées antitestostérone individuellement, puis en cocktail à faibles concentrations, comme celui

comprenant l'antifongique ketoconazole, autorisé pendant la grossesse, la théophylline, substance présente dans les feuilles de thé, l'acide valproïque, un antiépileptique, et le bisphénol A. En parallèle, avec des collègues de Londres, nous avons développé un modèle mathématique de prédiction des effets simultanés des molécules. Notre approche a ainsi apporté pour la première fois la preuve de concept de l'effet additif des molécules et donc de la démultiplication des effets chez l'homme. L'exacerbation de l'effet d'une molécule en présence d'autres antiandrogènes varie d'un facteur 10 à 10 000 selon la molécule. En outre, les effets observés sont cohérents avec les prédictions de notre modèle, ce qui est très intéressant pour la conception de futures expériences pour évaluer les risques chez les humains.

### Faut-il s'inquiéter ?

Il semble qu'il existe une fenêtre particulièrement sensible au cours du premier trimestre de grossesse. Notre travail ouvre une brèche vers l'étude de l'« exposome chimique ». Mais pour approcher les conditions réelles d'exposition, il faut maintenant développer des techniques permettant d'identifier et de quantifier toutes les molécules présentes dans un échantillon de liquide amniotique par exemple. Il faudra aussi travailler de façon multidisciplinaire, pas uniquement avec des biologistes ou des chimistes, mais aussi avec des toxicologues et des épidémiologistes, pour croiser des résultats d'enquêtes épidémiologiques, de statistiques, d'exposition animale *in vitro*, *in vivo*, etc. C'est ce à quoi nous nous employons maintenant. Il faut combiner les approches parce qu'on ne peut évidemment pas expérimenter directement sur l'homme. Les effets sur les œstrogènes ou d'autres hormones devront aussi être étudiés. De plus, l'exposition ne se limite pas à la grossesse : les effets tout au long de la vie restent à décrypter. ■

P. Gaudriault *et al.*, *Environmental Health Perspectives*, vol. 125, n° 8, 2017

## MÉDECINE

L'ENCRE VOYAGE  
DANS LA PEAU

**L**es pigments qui constituent l'encre des tatouages voyagent de l'épiderme de la peau jusqu'aux ganglions lymphatiques. Jusqu'ici rien de nouveau pour les médecins, puisqu'en examinant par imagerie médicale des personnes tatouées, ils constataient que certains ganglions étaient colorés. En revanche, ce qu'ils ne savaient pas, c'est que ces pigments diffusent dans notre corps sous forme de nanoparticules, éléments dont nous ne connaissons pas l'impact sur l'organisme. Ces nanoparticules ont été mises en évidence sur des échantillons de peau tatouée grâce aux puissants faisceaux à rayons X du synchrotron européen ESRF, à Grenoble. D'où l'importance de réaliser des tests sur les différents composés constituant l'encre des tatouages. ■

DONOVAN THIEBAUD

I. Schreiber et al., *Scientific Reports*, vol. 7, 11395, 2017

## ÉVOLUTION

LE POISON DE  
LA GRENOUILLE

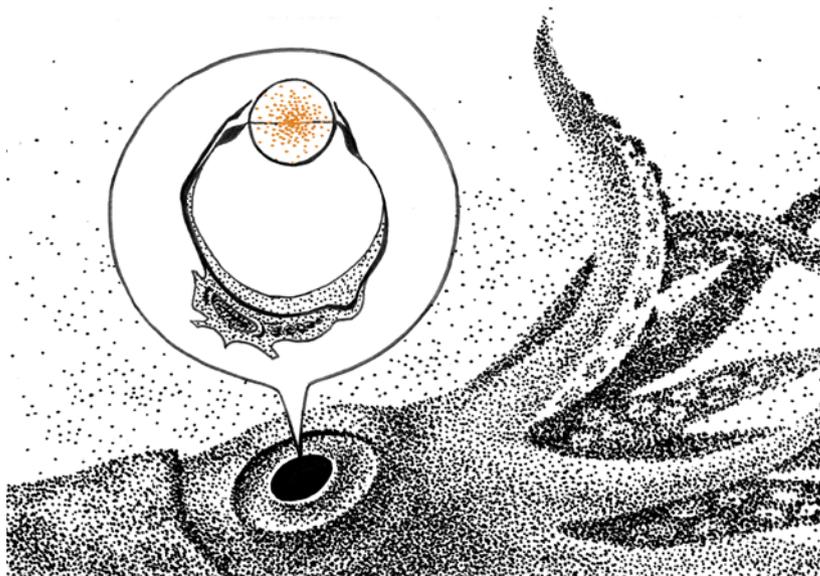
**D**ans la nature, les couleurs chatoyantes sont souvent un message pour le prédateur: «Je contiens du poison.» C'est le cas chez certaines grenouilles dont la peau contient des neurotoxines. En étudiant le cas de l'épibatidine, un alcaloïde découvert en 1974 chez la grenouille *Epipedobates anthonyi*, Rebecca Tarvin, de l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont compris pourquoi ces grenouilles ne s'empoisonnent pas elles-mêmes.

Chez une victime de la toxine, la molécule se fixe à certains récepteurs du système nerveux et provoque des crises d'hypertension ou d'épilepsie, entraînant parfois la mort. En analysant le génome de trois clades de grenouilles, les chercheurs ont montré que des mutations du gène codant le récepteur normalement sensible à la toxine le rendent insensible. L'équipe suggère qu'un ancêtre commun de ces grenouilles était probablement exposé naturellement à la toxine et que la sélection naturelle a préservé ces mutations qui l'ont rendu résistant. ■

S. B.

R. D. Tarvin et al., *Science*, vol. 357, pp. 1261-1266, 2017

## BIOCHIMIE

LE CRISTALLIN  
DU CALMAR  
RÉVÈLE SES SECRETS

Dans le cristallin de l'œil du calmar, la concentration en protéines (en orange) varie et modifie localement l'indice de réfraction. Cela élimine les aberrations géométriques et forme une image nette.

**L**e cristallin sphérique des yeux des calmars élimine toute forme d'aberration grâce à une variation continue, du centre jusqu'à la périphérie, de l'indice de réfraction du matériau. L'animal a ainsi, dans les sombres profondeurs sous-marines, une image parfaitement nette de son environnement. En analysant la composition en protéines du cristallin, Jing Cai, de l'université de Pennsylvanie, et ses collègues ont levé le voile sur ce biomatériau remarquable.

Le cristallin est un gel constitué d'eau et d'un mélange de protéines globulaires, les S-cristallines. C'est la concentration hétérogène de ces dernières qui est responsable de la variation de l'indice de réfraction. Au centre, les S-cristallines forment un réseau très dense, avec très peu d'eau, alors qu'en périphérie, elles ne représentent que 4% du matériau. Pourtant, cette inégale répartition restait difficile à expliquer, compte tenu de leur propension à diffuser librement dans le gel.

En étudiant les ARN messagers codant ces protéines, Jing Cai et ses collègues ont identifié 53 S-cristallines différentes se distinguant les unes des autres par environ 15% des acides aminés. Elles présentent toutes la même structure centrale, mais portent à leur surface des boucles d'acides aminés de longueurs variables. Plus la distance au centre du cristallin est grande, plus la proportion de protéines aux boucles courtes diminue. Constituant 34% de la masse totale de protéines au centre, ces dernières n'en représentent plus que 5% à la périphérie, remplacées graduellement par des protéines aux boucles de plus en plus longues. Ces boucles limitent les interactions entre protéines. Des simulations numériques ont établi qu'au centre, les S-cristallines aux boucles les plus courtes sont chacune liées à 6 voisines. Les protéines aux boucles longues ont un nombre de voisines restreint à 2. Le gel, plus riche en eau loin du centre, a ainsi un indice de réfraction plus faible. ■

MARTIN TIANO

J. Cai et al., *Science*, vol. 357, pp. 564-569, 2017

### DE L'EAU SUR LES TRAPPIST-1 ?

**L**e télescope spatial *Hubble* a livré des indices d'une possible présence d'eau sur les planètes du système de l'étoile TRAPPIST-1 en mesurant la quantité de rayons ultraviolets que les planètes reçoivent. Les rayons UV chauffent la haute atmosphère d'une planète et brisent les molécules d'eau. Ainsi, les planètes les plus proches de l'étoile, très exposées, pourraient avoir perdu l'équivalent de plus de 20 océans terrestres. Mais les planètes extérieures, y compris celles supposées habitables (TRAPPIST-1e, f et g), pourraient en avoir gardé une quantité importante à leur surface.

### LA FRUCTUEUSE FOUILLE D'ANTICYTHÈRE

**L'**épave d'Anticythère, célèbre pour le complexe mécanisme d'horlogerie grec qu'elle a livré, n'a manifestement pas encore tout dit ! Les archéologues marins qui l'étudient se sont en effet aperçus que des blocs tombés d'une falaise voisine la recouvrent en partie. Dans une zone non encore fouillée, les chercheurs ont découvert des éléments d'au moins sept grandes statues grecques en bronze. Ils espèrent les reconstituer bientôt.

### LA LOINTAINE ORIGINE DES RAYONS COSMIQUES

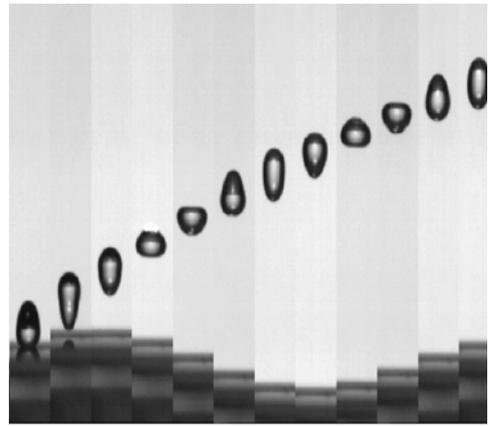
**L'**atmosphère terrestre est bombardée en permanence par des particules de très haute énergie, les rayons cosmiques. L'origine de ces particules les plus énergétiques (au-dessus de  $10^{18}$  électronvolts) reste à élucider. L'observatoire Pierre-Auger, en Argentine, a observé 30 000 de ces particules. La distribution de leur direction d'origine présente une structure anisotrope qui confirme l'hypothèse d'une source extragalactique.

## DES GOUTTES SUPERRAPIDES

**S**i l'on propulse une bille rigide et une goutte avec la même catapulte, laquelle sera éjectée avec la plus grande vitesse ? Contre toute attente, l'équipe de Franck Celestini, de l'Institut de physique de Nice, vient de prouver qu'il s'agit de la goutte, mettant ainsi en évidence le phénomène de superpropulsion.

Les chercheurs ont commencé par observer la propulsion de gouttes d'eau par une surface oscillante. Les gouttes étaient posées sur une plaque recouverte d'un film hydrophobe et fixée à un ressort, d'abord comprimé, puis relâché. Dans ces conditions, la vitesse de projection d'une bille solide est égale à la vitesse maximale de la plaque. Mais pour la goutte, surprise : sa vitesse peut atteindre une valeur 1,6 fois supérieure. En effet, la goutte étant déformable, sa vitesse correspond à la somme de la vitesse maximale de la plaque et de la vitesse de son centre de gravité dans le référentiel de la catapulte. C'est ce phénomène que les chercheurs ont nommé superpropulsion.

Le mouvement du centre de gravité de la goutte a sa propre fréquence. L'équipe a donc voulu comprendre l'influence du couplage entre la fréquence propre de la goutte et celle de la catapulte sur la vitesse afin d'atteindre la vitesse maximale de propulsion. Résultat : celle-ci était



La vitesse de propulsion d'une goutte peut être 1,6 fois supérieure à celle d'une bille rigide.

atteinte lorsque la fréquence d'oscillation de la goutte était près de trois fois supérieure à celle de la catapulte. Les physiciens ont ensuite étudié le cas de projectiles élastiques : le même rapport de fréquences fournissait la vitesse maximale de projection.

Cette superpropulsion pourrait servir dans divers domaines. En microfluidique, les chercheurs ont parfois besoin d'étudier le déplacement d'une goutte sur un substrat, puis de l'éjecter. Cette éjection pourrait être plus facilement réalisable grâce aux travaux de l'équipe française. ■

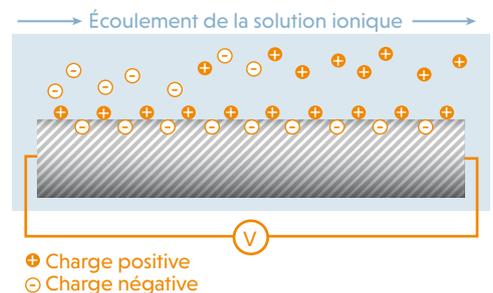
D. T.

C. Raufaste et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 108001, 2017

## NANOSOURCE D'ÉNERGIE

**S**i les installations hydroélectriques brillent souvent par leur gigantisme, elles sont peu adaptées pour des utilisations à des échelles miniatures. Les nanotubes de carbone pourraient changer la donne, d'après les travaux de Yifan Xu et ses collègues, de l'université Fudan, à Shanghai.

Les chercheurs ont mis au point des fibres d'environ 260 nanomètres de diamètre constituées de nanotubes de carbone alignés et ordonnés. Lorsqu'une solution ionique circule autour de ces fibres, une différence de potentiel, dépendante de la vitesse et de la nature du fluide, a été mesurée entre les deux extrémités du dispositif reliées à des électrodes. Avec une tension d'une centaine de millivolts et un courant de 0,06 milliampère, ces nanogénérateurs ont une production énergétique 100 à 1 000 fois



Dans un fluide en écoulement, la présence de la fibre crée une répartition hétérogène des ions sur sa longueur, d'où une différence de potentiel.

supérieure à celle des autres dispositifs de taille similaire fonctionnant grâce à des phénomènes électrostatiques. Testés avec succès lorsque le fluide est du sang, ces nanogénérateurs pourraient servir de source d'énergie pour des dispositifs électroniques médicaux implantés. ■

M. T.

Yifan Xu et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 56(42), pp. 12940-12945, 2017

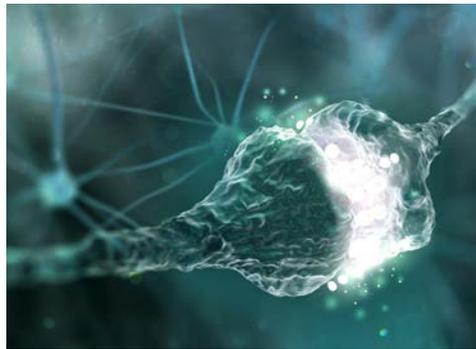
NEUROSCIENCES

# AGITATION DANS LES SYNAPSES

La plasticité synaptique du cerveau est essentielle dans les phénomènes d'apprentissage et de mémorisation. En effet, les cellules nerveuses ont la capacité de moduler l'efficacité de transmission d'information via l'échange de neurotransmetteurs dans les synapses, les points de contacts entre deux neurones. L'équipe de Daniel Choquet, à l'Institut interdisciplinaire des neurosciences de l'université de Bordeaux, a mis en évidence, dans l'hippocampe, le rôle crucial de la mobilité de récepteurs des neurotransmetteurs situés en dehors de la synapse.

Cette équipe avait déjà observé que les récepteurs postsynaptiques étaient mobiles à la surface des neurones. Pour vérifier leur rôle dans la plasticité synaptique, les chercheurs ont développé des outils moléculaires pour immobiliser *in vitro* ces récepteurs en dehors des synapses. Ils ont montré qu'il n'y avait alors plus de modulation de l'efficacité des synapses. «Toutes les phases de plasticité sont supprimées», explique Daniel Choquet.

Les chercheurs ont aussi étudié l'impact du blocage des récepteurs *in vivo* chez la souris. L'animal est placé dans un environnement avec



Vue d'artiste d'une synapse avec échange de neurotransmetteurs.

un stimulus négatif (induisant la peur). Puis, quelques jours plus tard, il est remis dans cet environnement sans le stimulus. Habituellement, la souris s'immobilise alors, inquiète: elle a gardé le souvenir du stimulus négatif lié à cet environnement. Mais si ses récepteurs ont été bloqués au préalable, le rongeur ne s'immobilise pas: il n'a pas mémorisé le stimulus.

Ces travaux ont aussi montré que le recrutement des récepteurs aux synapses pour assurer la plasticité neuronale se fait de deux façons, d'abord par une diffusion rapide des récepteurs déjà présents à la surface cellulaire et situés hors de la synapse, puis par exocytose de récepteurs stockés sous la membrane cellulaire. ■

N. G.

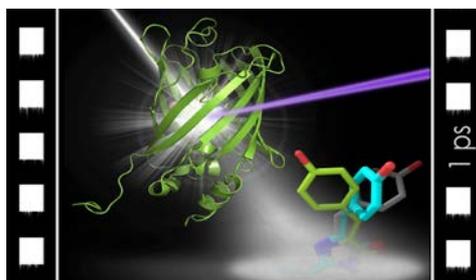
A. C. Penn, *Nature*, vol. 549, pp. 384-388, 2017

BIOPHYSIQUE

# UN FILM X DE PROTÉINES

Pour la première fois, une équipe internationale, dont des membres de l'Institut de biologie structurale de Grenoble, a filmé en temps réel la photocommutation d'une protéine fluorescente. L'objectif: comprendre la transition entre les états éteint (*off*) et fluorescent (*on*) afin d'améliorer l'efficacité de ces marqueurs, très utiles pour l'imagerie du vivant.

L'expérience des chercheurs a eu lieu en deux temps: ils ont d'abord activé le chromophore, la partie photosensible de la protéine, avec un laser, puis ont observé la molécule grâce au laser à rayons X de l'accélérateur linéaire de Stanford, aux États-Unis. En faisant varier le temps entre l'instant de l'activation et celui de l'observation, l'équipe a obtenu de nombreux clichés à différents stades de la commutation. Ils ont ainsi



Les biophysiciens ont réalisé des milliers de clichés pour obtenir un véritable film moléculaire.

reconstruit un véritable film du processus, qui met en évidence une structure transitoire de la protéine dans laquelle le chromophore se trouve dans un état «tordu», à mi-chemin entre les états stables *off* et *on*. Connaissant cet état, les biophysiciens espèrent améliorer l'efficacité du passage *off-on* des protéines fluorescentes en modifiant leur structure. ■

D. T.

N. Coquelle *et al.*, *Nature Chemistry*, en ligne, 11 septembre 2017

EN BREF

## DOUBLE MÉDAILLE D'OR DU CNRS

Cette année, le CNRS a récompensé des travaux qui ont rendu possible la découverte des ondes gravitationnelles. Alain Brillet, du laboratoire Artemis à Nice, a développé de nombreuses techniques pour améliorer les interféromètres laser. Il a participé au lancement du projet *Virgo* et au rapprochement avec l'expérience américaine *Ligo*. Thibault Damour, à l'IHES, a étudié la forme des ondes émises par la fusion de deux trous noirs. Une information cruciale et utilisée dans l'analyse des données de *Ligo* et *Virgo*.

## LES DERNIÈRES TRACES DE VIE LES PLUS ANCIENNES

L'analyse isotopique du graphite découvert au nord du Labrador au sein de roches vieilles de 3,95 milliards d'années suggère qu'il a été produit par des organismes marins autotrophiques, c'est-à-dire capables de produire leur propre nourriture. Si ce résultat, dû à Tsuyoshi Komiya, de l'université de Tokyo, et ses collègues, devait se confirmer, cette trace de vie serait 150 millions d'années plus ancienne que celle qui détenait le record jusque-là, et ne suivrait que de 500 millions d'années la formation de la Terre.

## UN SECOND TROU NOIR BIEN CACHÉ

On connaissait Sagittarius A\*, le trou noir supermassif d'environ 4 millions de masses solaires au centre de la Voie lactée. D'après les données du radiotélescope Alma, il pourrait exister un autre trou noir près du centre galactique, de seulement 100 000 masses solaires. Il se cacherait dans un nuage moléculaire, à 200 années-lumière de son voisin plus massif. Mais d'où vient-il ? Pour Tomoharu Oka, de l'université Keio, et ses collègues, le nuage serait les vestiges d'une galaxie naine avalée par la Voie lactée.

## PHYSIOLOGIE

## L'HORLOGE BIOLOGIQUE

Tous les organismes vivants ont une horloge biologique interne qui leur permet de s'adapter au rythme journalier. Les Américains Jeffrey Hall, Michael Rosbash et Michael Young ont été récompensés pour avoir compris son fonctionnement. Ils ont notamment réussi à isoler un gène, *period*, qui contrôle le rythme biologique journalier, ou rythme circadien. Ce gène code une protéine dont la concentration dans les cellules oscille selon un cycle de 24 heures, de façon synchrone avec le rythme circadien. Les trois lauréats ont aussi identifié deux autres gènes participant à la bonne marche de cette horlogerie cellulaire. (Voir aussi l'article « Quel âge a Pour la Science? », page 104.) ■

D. T.

W. A. Zehring et al., *Cell*, vol. 39, pp. 369-376, 1984 ;  
T. A. Bargiello et al., *Nature*, vol. 312, pp. 752-754, 1984

## PHYSIQUE

## VIBRATIONS DE L'ESPACE-TEMPS

Rainer Weiss, du MIT, Kip Thorne et Barry Barish, de Caltech, sont récompensés pour leur contribution à la première détection directe d'ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015, par l'expérience américaine *Ligo* (voir l'article de Nathalie Deruelle et Jean-Pierre Lasota, page 98).

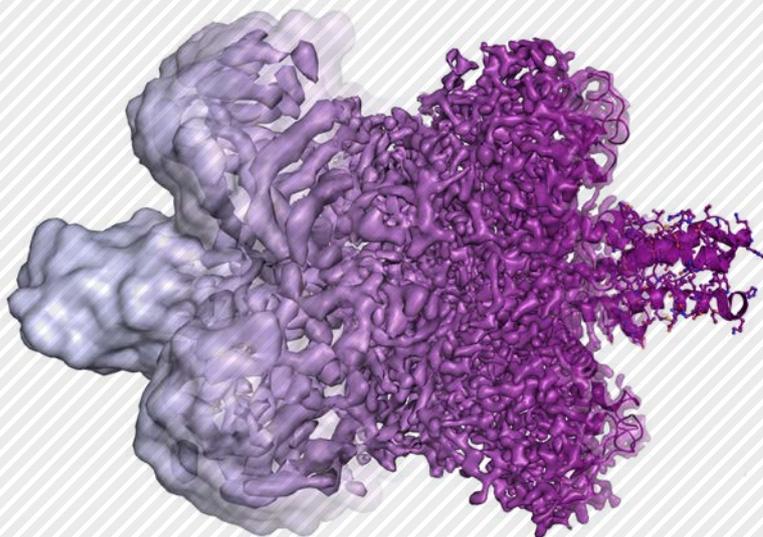
Avec Ronald Drever, Rainer Weiss et Kip Thorne ont développé les premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles à interférométrie laser. À eux trois, ils ont lancé le projet *Ligo*. Mais pour atteindre la sensibilité nécessaire, l'équipe a dû s'agrandir afin de développer de nouvelles techniques. Lorsque Barry Barish a pris la tête du projet en 1994, il l'a transformé en une collaboration à l'échelle internationale avec plus d'un millier de membres. Et *Ligo* jouit aujourd'hui d'un partenariat privilégié avec l'expérience européenne *Virgo*. Ils ont détecté en août 2017 leur première onde gravitationnelle commune, la quatrième pour *Ligo*. ■

S. B.

B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, 061102, 2016

## CHIMIE

## LA CRYOMICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE RÉCOMPENSÉE



Avec les avancées en cryomicroscopie électronique, la résolution des images tridimensionnelles molécules s'est améliorée (la gauche de l'image donne le rendu avant 2013, la droite, après 2013).

Le prix Nobel de chimie revient à Jacques Dubochet, de l'université de Lausanne, Joachim Frank, de l'université Columbia, et Richard Henderson, du laboratoire de biologie moléculaire de Cambridge, au Royaume-Uni, pour leurs travaux sur le développement de la cryomicroscopie électronique. Grâce à cette technique, les biochimistes peuvent observer avec précision les molécules du vivant, figées dans leur mouvement.

Entre 1975 et 1986, Joachim Frank a développé une méthode pour créer une image de haute résolution en 3D en fusionnant plusieurs images en 2D, obtenues par microscopie électronique. Cependant, une contrainte des observations par microscopie électronique est qu'elles doivent se faire sous vide. Dans ces conditions, l'eau liquide où baignent les échantillons s'évapore, ce qui rend impossible l'observation de ces derniers. Au début des années 1980, Jacques Dubochet a montré que l'eau pouvait être vitrifiée, c'est-à-dire qu'à une certaine vitesse de congélation, les molécules d'eau contenant l'échantillon biologique se figent, mais ne cristallisent pas. Les molécules de l'échantillon sont alors immobilisées sans être détériorées.

Grâce à ces avancées, en 1990, Richard Henderson a réussi, pour la première fois, à utiliser la microscopie électronique pour visualiser des protéines en trois dimensions et à haute résolution. De nombreuses améliorations ont suivi pour atteindre en 2013 la résolution atomique voulue pour des reconstructions 3D précises des molécules. Récemment, cette technique d'observation a, par exemple, permis d'analyser la structure du virus Zika. ■

D. T.

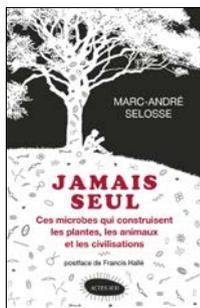
J. Frank et al., *Ultramicroscopy*, vol. 6, pp 343-357, 1981 ; J. Dubochet et al., *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 10, pp 143-146, 1985

BIOLOGIE

**JAMAIS SEUL**

Marc-André Sélosse  
Actes Sud, 2017  
368 pages, 24,50 euros

L'héritage de l'ère pasteurienne nous a longtemps convaincus que les microbes et microorganismes, associés aux maladies infectieuses et à la décomposition, étaient des pathogènes redoutables qu'il fallait combattre à tout prix. Or, depuis peu, la réhabilitation du microbiote intestinal et cutané comme acteurs décisifs de notre équilibre biologique nous fait changer de paradigme. D'ennemis, ils sont devenus



des partenaires essentiels et indispensables à la vie, aussi bien dans le monde végétal qu'animal. Au fil des pages de ce livre passionnant, l'auteur, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, nous

entraîne dans une aventure qui illustre à quel point ce constat d'omniprésence et de coopération universelle des microbes s'applique à tous les champs de la biologie moderne.

Avec humour et anecdotes à foison, il décrypte cette relation symbiotique et adaptative des plantes et des animaux – l'homme compris – avec ces compagnons invisibles qui contribuent largement à leur développement, à leur défense, à leur immunité, à leur nutrition et à l'adaptation du comportement au milieu. Car la symbiose crée de nouvelles fonctionnalités chez les hôtes de ces microorganismes, en éliminant certains composés végétaux délétères, en adaptant le monde animal à son milieu végétal et en favorisant la complexité du vivant. Plus remarquable encore, la symbiose microbienne à tous les niveaux de chaque écosystème est susceptible d'influer sur nombre de déterminants sociaux et culturels, d'habitudes alimentaires, de modes de vie et de comportements adaptatifs, qui exercent eux-mêmes une influence durable sur les fondements mêmes des civilisations.

BERNARD SCHMITT / CERNH, LORIENT

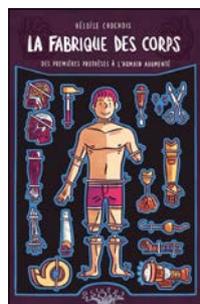
ANTHROPOLOGIE-MÉDECINE

**LA FABRIQUE DES CORPS**

Héloïse Chochois  
Octopus, 2017  
160 pages, 18,95 euros

L'amputation d'une partie du corps est un thème difficile. Comment rendre accessible ce sujet tabou et l'analyser sereinement à la lumière de nos connaissances actuelles? C'est le défi que s'est lancé l'auteure et illustratrice Héloïse Chochois en réalisant ce petit bijou d'ouvrage.

Ce parcours allant des « premières prothèses à l'humain augmenté » est une bande dessinée aux traits simples, mais efficaces : en quatre chapitres (1. Amputation, 2. Membre fantôme, 3. Prothèses et 4. Transhumanisme), l'auteure met en scène un jeune accidenté amputé d'un bras à son réveil, et qui se pose des questions



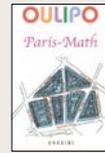
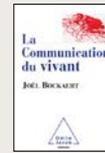
aussi bien cliniques qu'existentielles. Cette véritable fable graphique nous plonge avec érudition et sensibilité dans l'histoire des sciences et des techniques de l'amputation, de l'Antiquité aux

dernières prothèses neuroconnectées. Héloïse Chochois nous fait aussi voyager avec une finesse chirurgicale dans les méandres de notre système nerveux central. Enfin, elle questionne sans prendre parti la limite entre homme réparé et homme augmenté.

Même si l'on regrette que l'évolution des primates soit représentée sous la forme d'une lignée et non d'une arborescence, voilà un beau travail de vulgarisation des sciences ; une véritable « thèse illustrée de la prothèse » qui n'est pas dénuée d'humour non plus, car on y apprend par exemple qu'en 1793, il a fallu amputer Louis XVI de sa tête!

J.-SÉBASTIEN STEYER / CNRS-MNHN

ET AUSSI



**LES SOLS ET LA VIE SOUTERRAINE**

J.F. Briat et D. Job (dir.)  
Quæ, 2017  
328 pages, 49 euros

Plus d'une soixantaine de spécialistes font le point sur les interactions entre plantes et organismes du sol. Fruit de l'invention du séquençage à haut débit de l'ADN, la métagénomique rend désormais possible la caractérisation des communautés de microorganismes des sols. La génétique moléculaire montre que les exsudats de plantes conditionnent le microbiote racinaire. Des bio-indicateurs de la vie des sols sont donnés à l'échelle de la France. De bonnes bases biologiques pour l'agroécologie !

**LA COMMUNICATION DU VIVANT**

Joël Bockaert  
Odile Jacob, 2017  
206 pages, 22,90 euros

L'auteur, neurobiologiste et membre de l'Académie des sciences, passe en revue les modes de communication dans le vivant, depuis les bactéries et leurs structures communicantes jusqu'à l'hypercommunication chez les humains, en passant par les messages chimiques (phéromones, etc.) et physiques (lumière, toucher, etc.). Justement, le chapitre consacré à l'hypercommunication qui se développe dans la société humaine depuis l'arrivée d'Internet est un vrai bijou de clarté, d'esprit de synthèse et de bon sens.

**PARIS-MATH**

Oulipo  
Cassini, 2017  
304 pages, 14 euros

Ce petit livre est consacré à quelques-unes des relations nombreuses entre Paris et les mathématiques. Il évoque par de petits textes humoristiques et gorgés d'informations mathématiques les rues portant des noms de mathématiciens, propose un topoguide mathématique, présente une étude géométrique des frises du métro... Et cela peut se lire aussi en anglais, puisque le livre commence par la mention : *To read Paris-Math in English, turn over the book !* Quant à l'auteur, il s'agit de l'« Ouvroir de littérature potentielle » (Oulipo), un groupe « ou plutôt un ensemble » d'écrivains et de mathématiciens fondé en 1960 par Raymond Queneau et François Le Lionnais.

## PARIS

DU 14 NOVEMBRE 2017 AU 1<sup>ER</sup> AVRIL 2018Musée du Quai Branly  
[www.quaibrantly.fr](http://www.quaibrantly.fr)

## Le Pérou avant les Incas



Un grelot représentant la divinité des Mochicas.

Tout le monde a entendu parler des Incas, mais les Chimús, les Mochicas, les Cupisniques, la culture Lambayeque sont beaucoup moins familiers. Le musée parisien offre une belle occasion de découvrir ces anciennes sociétés oubliées qui se sont épanouies dans le nord du Pérou actuel, dans un territoire désertique et inhospitalier. Notamment, il y a plus de 1500 ans, les Mochicas ont été parmi les premiers à avoir construit une structure éta-

gique et ont posé les bases de la civilisation préhispanique. En s'appuyant sur les récentes découvertes archéologiques réalisées dans la région, l'exposition porte sur l'origine et l'organisation du pouvoir dans ces sociétés anciennes. Près de 300 œuvres, issues des plus grands sites archéologiques, évoquent les diverses manifestations et représentations du pouvoir dans ces cultures dont certaines datent de près de quatre millénaires. ■

## LOUVAIN (BELGIQUE)

À PARTIR DU 18 NOVEMBRE  
Musée L, Louvain-la-Neuve  
[www.museel.be](http://www.museel.be)

## Inauguration du Musée L



L'université catholique de Louvain (UCL) se dote d'un grand musée où seront exposées 1500 œuvres des 32000 que comptent ses collections. Sur 2100 mètres carrés et 5 niveaux, objets scientifiques et œuvres d'art seront présentés selon 5 « élans » : s'étonner, se questionner, transmettre, s'émerveiller et contempler. ■

## GRENOBLE

JUSQU'AU 26 AOÛT 2018  
Muséum de Grenoble  
[www.grenoble.fr/639-museum-de-grenoble.htm](http://www.grenoble.fr/639-museum-de-grenoble.htm)

## Sur les îles du ciel



Les îles du ciel, ce sont les hauts sommets montagneux : un milieu extrême où l'eau est rare, le vent glacial et les rayons du soleil agressifs. Pourtant, nombre de plantes à fleurs s'y sont adaptées. Comment ? Cette exposition propose de découvrir ces plantes surprenantes et leur étude scientifique depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. ■

## ET AUSSI

Vendredi 3 novembre, 9 h 30  
Rosnay (Indre)  
[www.parc-naturel-brenne.fr](http://www.parc-naturel-brenne.fr)  
Tél. 02 54 28 12 13  
**GRUES CENDRÉES**  
Une excursion consacrée au plus grand oiseau sauvage de France.

Samedi 4 novembre  
Dourdan (Essonne)  
[www.snnpn.com](http://www.snnpn.com)  
**CHAMPIGNONS EN FORÊT DE DOURDAN**  
Une journée à la découverte des nombreuses espèces de champignons qui poussent dans cette forêt sableuse au relief prononcé, peuplée de feuillus ou de pins. C'est la saison !

Les 14 et 16 novembre, 18 h  
Chambéry (73) et Arancy (74)  
[www.univ-smb.fr/amphis](http://www.univ-smb.fr/amphis)  
Tél. 04 79 75 91 20  
**VILLAGES LACUSTRES PRÉHISTORIQUES EN SAVOIE**

Dans le cadre des conférences Amphis pour tous, Mélanie Duval, géographe du CNRS à l'université de Savoie, parle des sites palafittiques préhistoriques des lacs alpins et de leur valorisation.

Dimanche 19 novembre  
Forêt d'Armainvilliers (Gretz, Seine-et-Marne)  
Tél. 01 44 67 96 90  
**INITIATION MYCOLOGIQUE**

Une sortie pour se familiariser avec les champignons, en compagnie de deux spécialistes membres de la Société mycologique de France.

Mardi 28 novembre, 18 h  
Espace culture, université de Lille (Villeneuve-d'Ascq)  
[culture.univ-lille1.fr/agenda/](http://culture.univ-lille1.fr/agenda/)  
**CROISSANCE ET FORMES**  
Une conférence du mathématicien Alain Trounev (ENS-Cachan) à l'occasion des 100 ans de la parution de l'étonnant ouvrage *On Growth and Forms*, d'Arcy Thompson, dont les idées résonnent aujourd'hui dans divers domaines tels que la reconnaissance automatique des formes et l'anatomie computationnelle.



LA CHRONIQUE DE  
**GILLES DOWEK**

# L'ACCÈS AU RÉSEAU, UN DROIT FONDAMENTAL?

En mettant en ligne certains services, l'État et les entreprises réalisent des économies. Celles-ci devraient servir à financer l'accès au réseau de ceux qui n'en ont pas les moyens.



De plus en plus de services sont disponibles uniquement en ligne. Comment lutter contre l'exclusion de ceux qui n'ont pas accès au réseau ?

**C**inquante ans après la création du réseau Internet, presque 50% de la population mondiale l'utilise régulièrement, et cette proportion dépasse 90% dans certains pays, comme la Norvège ou le Royaume-Uni. De ce fait, ne pas avoir accès à un ordinateur, une tablette ou un téléphone connectés au réseau, ou ne pas savoir se servir d'un tel objet, devient un handicap. Ainsi émerge l'idée de faire de l'accès au réseau un droit fondamental.

Donner à chaque humain un accès au réseau a cependant un coût. Si l'accès au réseau devenait un droit fondamental, comment financer les programmes qui rendraient ce droit effectif? En fait, certaines particularités des réseaux constituent une corne d'abondance pour un tel financement.

Pour le comprendre, imaginons qu'Alice et Béchir aient accès à un réseau quelconque. Donner aussi à Chan accès à ce réseau permet non seulement à Chan de communiquer avec Alice et Béchir, mais également à Alice et Béchir de

communiquer avec Chan. Ce n'est donc pas uniquement Chan qui profite de cette opération, mais aussi Alice et Béchir.

Plus généralement, si un réseau permet à  $n$  personnes de communiquer et si la valeur, pour une personne, de pouvoir communiquer avec une autre personne est une constante  $c$ , alors la valeur de l'accès à ce réseau, pour chaque personne

Donner accès au réseau à une nouvelle personne profite à tous

qui y a accès, est  $c(n-1)$ . Soit, pour l'ensemble de ces personnes, une valeur de  $cn(n-1)$ . Comme le remarquait Robert Metcalfe, cette valeur est proportionnelle non pas au nombre  $n$  de nœuds du réseau, mais au nombre  $n(n-1)$  de ses liens orientés, c'est-à-dire au carré du nombre de ses

nœuds. Donner un accès au réseau à une nouvelle personne augmente donc cette valeur de  $2cn$ . Le premier  $cn$  correspond à la valeur de l'accès pour cette nouvelle personne, en mesure désormais de communiquer avec les  $n$  personnes qui avaient déjà accès à ce réseau, et le second à l'augmentation de la valeur de l'accès pour ces  $n$  personnes, qui peuvent communiquer avec une personne de plus. Ainsi, donner accès à un réseau à une nouvelle personne profite à tous. Il y a donc un intérêt à financer l'accès au réseau de cette nouvelle personne, quand celle-ci n'a pas les moyens de le faire.

Par exemple, les services en ligne permettent aux banques de réduire leurs coûts, car elles n'ont plus besoin d'avoir une agence dans chaque petite ville. Mais ces services augmentent les coûts pour les clients de ces banques, qui ont alors besoin d'un accès au réseau pour effectuer des opérations sur leur compte. Ce transfert de coût n'est pas dans l'intérêt de ces clients, mais il n'est pas non plus dans l'intérêt des banques elles-mêmes, si elles perdent leurs clients non connectés. Il est donc dans l'intérêt des banques de participer à ces programmes d'accès universel au réseau, qui leur permet de réduire leurs coûts tout en gardant leurs clients.

De même, l'informatisation de l'administration permet à l'État de réduire ses coûts. Avant chaque élection, nous recevons, par la poste, les professions de foi de chaque candidat. Mettre ces documents en ligne permettrait d'éviter l'envoi de millions de courriers. Cependant, les principes de la démocratie exigent que, avant que nous cessions d'envoyer ces courriers, chaque citoyen ait accès au réseau.

Comme pour les banques, les économies réalisées par l'État pourraient être réinvesties dans des programmes d'accès universel au réseau. Ainsi, l'accès universel au réseau se distingue des – tout aussi importants – autres droits fondamentaux, tels l'accès universel à l'eau, au total, ou au logement, en cela qu'il ne coûte rien. ■

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

# FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL  
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,  
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

[www.ademe.fr/theses](http://www.ademe.fr/theses)





LA CHRONIQUE DE  
**GÉRALD BRONNER**

# CE N OANIMISME QUI VIENT

Le procès intenté à propos d'un selfie de macaque reflète  
l'essor d'une vision anthropomorphique du monde.



L'un des selfies pris par Naruto, le macaque nègre qui s'est saisi de l'appareil de David Slater.

**I est certain que les animaux ne sont pas les machines organiques qu'avait imaginées Descartes**; il est non moins vrai qu'ils ressentent la douleur, ont des émotions et que certains sont dotés de compétences cognitives que les hommes ont longtemps sous-estimées. Grâce à l'éthologie contemporaine, les frontières étanches que l'histoire des idées a construites entre les humains et le reste du monde animal sont devenues poreuses. De cette porosité relative, certains en ont conclu abusivement que les humains étaient des animaux (ce qui est vrai) comme les autres (ce qui est douteux).

Cette conclusion a conduit récemment certaines associations à réclamer des droits pour les animaux que personne ne songeait à leur accorder hier encore. De ce point de vue, l'aventure mondialement connue de David Slater a connu en septembre dernier un dénouement fascinant. Ce Britannique, photographe professionnel, est parti il y a quelques années en mission sur l' le indonésienne de Sulawesi où vivent les macaques nègres (*Macaca nigra*),

une espèce menacée d'extinction. L'un de ces animaux lui subtilisa son appareil photo et prit quelques clichés. Lorsque David Slater récupéra son appareil, il eut la surprise de voir que certaines de ces photos étaient réussies.

L'affaire aurait pu s'arrêter là, mais il se trouve qu'une de ces photos – un selfie hilarant (*ci-dessus*) – a eu un succès mon-

**Bientôt des droits pour les plantes et pour les robots?**

dial et la question s'est posée de savoir si les droits d'auteur devaient revenir à l'homme ou au macaque. Peta, une association américaine de défense des animaux, a engagé des actions en justice et a fini par conclure un accord à l'amiable avec le photographe: 25% des droits générés par l'image seront versés à des œuvres desti-

nées à protéger les milieux de vie de ce singe et d'autres macaques indonésiens.

Faut-il vraiment octroyer aux animaux des droits d'auteur? Et faut-il encore aller plus loin? C'est ce que pense par exemple le neurobiologiste italien Stefano Mancuso, qui réclame des droits pour les plantes cette fois! Dans l'ouvrage *Verde brillante*, il invite à élargir notre conception de l'intelligence et à considérer que les végétaux, qui réagissent à leur environnement et ont parfois des stratégies pour contrer les prédateurs, n'en sont pas dépourvus. Dans ces conditions, ne devraient-ils pas aussi bénéficier de cette extension de la prise en compte des droits du vivant?

Stefano Mancuso compare même l'arborescence des racines des arbres à Internet. Ce qui résonne avec un autre aspect étonnant de cette extension: certains exigent   présent des droits pour les robots et les intelligences artificielles.

C'est le cas de Kate Darling, par exemple, une chercheuse au MIT. Certes, elle ne réclame que des droits de «second ordre» pour nous protéger des sentiments que nous pourrions ressentir à la vue de la maltraitance d'un robot humanoïde. Mais qui sait jusqu'où pourrait conduire ce raisonnement, à l'heure où une partie de la planète semble persuadée qu'aux  tats-Unis, un robot s'est «suicidé» dans un centre commercial en se «jetant» dans une fontaine artificielle?

Depuis la nuit des temps, l'homme adore conférer des  mes aux éléments de son environnement, mais l'histoire des idées avait peu à peu vidé l'univers des esprits dont l'imagination humaine l'avait peuplé. Ce n oanimisme qui conduit à le remplir de nouveau est donc surprenant, d'autant que ceux qui sont à la manœuvre ici et réclament des droits pour les animaux, pour les plantes (et peut-être bientôt pour les minéraux) revendiquent souvent, parallèlement, un retrait global de l'homme. Ils aspirent à une moindre empreinte de notre espèce dans notre environnement et ne paraissent pas se rendre compte que leur manœuvre aboutit à une anthropomorphisation du monde. ■

**GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.**



# 40 ANS DE DÉCOUVERTES

**D**e nos jours, la science avance à un tel rythme qu'aucun humain n'est capable de suivre l'ensemble des découvertes qui s'égrènent de jour en jour et d'année en année. *Pour la Science* a cependant voulu offrir à ses lecteurs, à l'occasion de son quarantième anniversaire, un panorama synthétique des avancées les plus marquantes des quatre dernières décennies.

Le choix fut difficile et suscita de longues discussions à la rédaction. La découverte du prion est-elle plus importante que l'identification du virus du sida? La démonstration du théorème de Fermat est-elle plus fructueuse que celle de la conjecture de Kepler sur l'empilement de sphères?... Le résultat de nos délibérations se traduit dans les 86 pages suivantes que vous lirez, nous l'espérons, avec plaisir. Avant d'aborder (*page 104*) une instructive réflexion sur l'âge de *Pour la Science*, qui n'est pas forcément donné par le nombre 40... Bonne lecture!

# 1977



- La **cryptographie à clé publique** voit le jour [p. 23](#)
- Naissance en Angleterre de Louise Brown, le premier **bébé-éprouvette**
- Première observation directe de l'**augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub>** dans l'océan
- On découvre **des fossiles de bactéries** vieux de 3,4 milliards d'années
- Mise en évidence par Mitchell Feigenbaum, Pierre Coulet et Charles Tresser d'une propriété d'**universalité dans les systèmes dynamiques chaotiques**

- Klaus von Klitzing met en évidence l'**effet Hall quantique entier**
- L'assemblée de l'OMS déclare la **variole éradiquée**
- Alan Guth publie sa théorie de l'**inflation cosmique**
- Sur la base de traces géologiques, des chercheurs affirment que l'**extinction des dinosaures est due à la chute d'un astéroïde** [p. 28](#)

1978

1980

1977

1979

1981

- On identifie une troisième forme de vie aux côtés des eucaryotes et des bactéries : les **archées**
- On remarque que l'ADN comporte des séquences non codantes, que l'on nommera **introns**, intercalées entre les régions codantes, les **exons**
- Commercialisation des **premiers ordinateurs personnels**
- Walter Gilbert et Fred Sanger développent chacun une méthode de **séquençage de l'ADN** [p. 20](#)
- Kenneth Appel et Wolfgang Haken prouvent le **théorème des quatre couleurs** [p. 23](#)

- **Modification génétique de bactéries** pour qu'elles produisent de l'insuline
- Premières observations de l'effet de **lentille gravitationnelle**
- Daniel Kahneman et Amos Tversky publient un article fondateur de la « **théorie des perspectives** » [p. 24](#)

- Le centre médical de l'université Stanford réussit à faire une **transplantation cœur-poumon**
- Commercialisation de l'IBM-PC et du **premier ordinateur portable**, l'Osborne 1
- Des **cellules souches** embryonnaires de souris sont cultivées
- Le **vaccin contre l'hépatite B** est approuvé aux États-Unis
- Le physicien suisse Heinrich Rohrer et le physicien allemand Gerd Binnig construisent un **microscope à effet tunnel**



Wikimedia Commons

# 1986

- Les expériences d'Alain Aspect et ses collègues démontrent la **violation des inégalités de Bell** par la physique quantique **p. 30**
- Découverte de la bactérie ***Helicobacter pylori***, puis de son rôle dans l'ulcère de l'estomac
- Les entreprises Sony et Philips lancent le **CD audio**
- L'équipe de Stanley Prusiner découvre un nouveau type d'agent infectieux impliqué dans des maladies neurodégénératives, les **protéines prions**

- Jean Morlet et Alex Grossmann posent les bases de la technique mathématique d'**analyse par ondelettes**
- Premières découvertes de **quasi-cristaux**
- Un premier gène contrôlant l'**horloge circadienne** est identifié chez la drosophile

- Mise au point d'un procédé d'amplification de l'ADN, la **PCR** (*Polymerase Chain Reaction*)
- Découverte de l'**apoptose**, ou mort cellulaire programmée, et de gènes impliqués dans ce processus
- Rendez-vous de la sonde Giotto avec la **comète de Halley**

NASA/ESA/Giotto Project

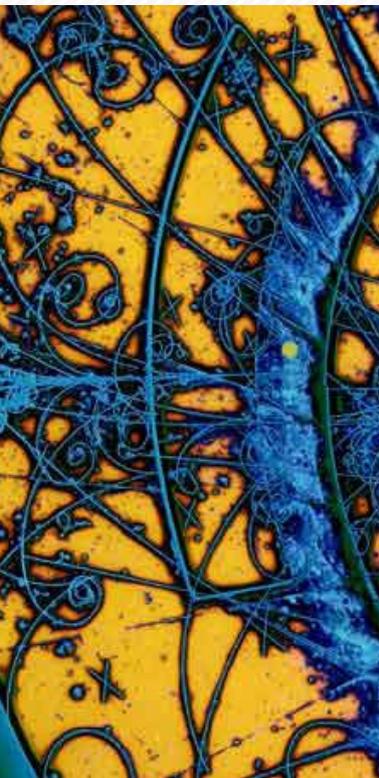
1982

1983

1984

1985

1986

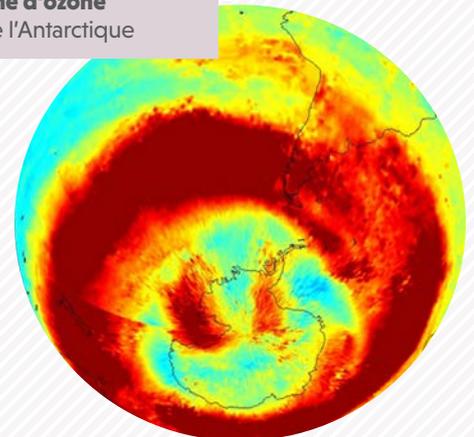


Cern/BEBC

- Mise en évidence des **bosons W et Z** au Cern **p. 34**
- Le **virus du sida** est identifié **p. 35**
- Découverte de l'**homéoboîte**, une séquence d'ADN commune à un ensemble de gènes et essentielle au développement embryonnaire **p. 35**
- Le tabac, première **plante génétiquement modifiée**
- Fin de la démonstration du **théorème de classification des groupes finis simples**

- Les **fullerènes**, nouvelle forme du carbone **p. 36**
- Généralisation des systèmes de **calcul formel** tels que Maple
- Découverte du **trou dans la couche d'ozone** au-dessus de l'Antarctique

Nasa/JPL



# 1977 Premier génome séquencé

## La saga de l'ADN

En 1977, il fallait plusieurs mois, grâce à une toute nouvelle technique, pour décrypter les onze gènes d'un petit virus de bactérie. Bientôt, les séquenceurs analyseront un génome humain en quelques heures.

**L**e génome du phage phiX174 ne comptait que 5386 nucléotides (les constituants de l'ADN) et 11 gènes – rien à côté des génomes analysés aujourd'hui. Pourtant, le séquençage de ce virus bactérien en 1977, au prix de plusieurs mois de travail, fit sensation. Il prouvait que des outils existaient enfin pour lire l'ADN. Pour comprendre à quel point ces outils étaient attendus, il faut remonter bien plus tôt.

La compréhension des mécanismes de l'hérédité ne date pas des seuls travaux, fussent-ils remarquables, du moine autrichien Gregor Mendel. Comme toute science, la génétique s'est construite pas à pas, à partir de connaissances acquises depuis des siècles par les «hybrideurs» et par la montée en puissance des méthodes statistiques. Ainsi, Mendel, en utilisant des petits pois, put travailler sur de très grands échantillons. Ses plans expérimentaux, conçus avec rigueur, lui permirent d'établir, en 1865, ses fameuses lois qui définissent la manière dont les caractères héréditaires sont transmis d'une génération à l'autre. Ces résultats ne furent à l'époque ni compris ni acceptés. Ils furent redémontrés trente-cinq ans plus tard chez d'autres plantes, mais aussi la drosophile, puis la souris.

L'avènement de la génétique moderne ouvrait des questions fondamentales: quel support moléculaire était responsable de ces mécanismes? Quelle était la nature biochimique du système d'information du vivant? Comment fonctionnait-il? Comment se transmettait-il à la génération suivante? De nombreuses hypothèses furent émises au début du xx<sup>e</sup> siècle dans un climat passionné. On touchait là au cœur même de la vie, au cœur de nos origines, de notre identité, de l'unicité de chacun. Après la démonstration que ce système d'information est véhiculé par les chromosomes, deux expériences princeps, très élégantes, identifièrent la nature de la molécule support de l'hérédité.

### L'ADN, SUPPORT DE L'HÉRÉDITÉ

En 1928, Frederick Griffith, microbiologiste anglais, recherchait un vaccin contre le pneumocoque. Il avait à sa disposition deux souches, l'une mortelle chez la souris, l'autre non virulente. S'inspirant des travaux de Pasteur, Griffith injecta aux souris des bactéries non virulentes vivantes ou des bactéries virulentes tuées par la chaleur. Aucune de ces préparations ne tua les souris. En revanche, injectées successivement ou ensemble, elles provoquaient leur mort. De plus, les bactéries non virulentes, devenues alors mortelles, transmettaient désormais ce caractère de



### L'AUTEUR



**PIERRE TAMBOURIN**  
biologiste, directeur  
général de Genopole,  
à Évry, de 1998  
à 2017 et membre  
de l'Académie  
des technologies

virulence à leur descendance: un facteur « transformant » passait de la souche virulente tuée à la souche inoffensive et modifiait l'hérédité de ces bactéries. L'expérience fut reprise en 1944 par Oswald Avery, Colin MacLeod et Maclyn McCarthy, de l'institut Rockefeller, à New York. Ils substituèrent aux bactéries virulentes tuées des extraits hautement purifiés de ces bactéries tueuses (protéines, lipides, capsules, acides nucléiques). Le facteur modificateur de l'hérédité était présent seulement dans l'extrait ne contenant que des acides nucléiques, essentiellement de l'acide désoxyribonucléique ou ADN.

À cette époque, l'ADN était déjà bien connu, mais sa constitution – la répétition de quatre éléments – paraissait beaucoup trop simple pour qu'il joue un rôle dans l'hérédité de ces bactéries. On supposait qu'il contribuait à l'architecture des chromosomes, à l'instar de l'actine dans le squelette des cellules. De plus, on ignorait que l'ADN était présent dans la plupart des microorganismes. La grande richesse et la complexité du monde des protéines paraissaient bien mieux correspondre à l'extraordinaire variété du vivant.

## LECTURE RAPIDE

**Séquencer 3 milliards de bases, taille du génome humain, équivaut à déchiffrer, lettre à lettre, un livre de format A4 d'environ 450 000 pages ! À la vitesse de 10 éléments par seconde, la lecture prendrait 10 ans, alors qu'une cellule réplique, en le lisant, son génome en quelques heures, à la vitesse prodigieuse de 170 000 nucléotides par seconde via un processus hautement parallèle.**

Un chromosome humain, de quelques micromètres de long, est constitué d'un brin d'ADN de quelques centimètres compacté. Chaque chromosome (ici une paire) compte entre 50 et 200 millions de paires de nucléotides.

Ce fut donc un tollé quasi général et Avery n'obtint jamais le prix Nobel ! Il fallut l'intervention des physiciens du « groupe des phages » (Alfred Hershey, Max Delbrück, Salvador Luria), un réseau informel de scientifiques, et leurs remarquables travaux pour clore le débat sur la nature de la molécule support de l'hérédité.

Ce pas décisif franchi, de nombreux laboratoires se mirent à étudier l'ADN et examiner les innombrables questions qui se posaient, dont la première – sur sa structure – reçut une réponse dès 1953 (James Watson, Francis Crick) : l'ADN est une double hélice souvent très longue, de quelques milliers à plusieurs milliards d'éléments, composée de quatre bases (A, C, T, G) organisées de manière linéaire précise, suggérant un système de codage de l'information en base 4. Cette structure en double hélice, constituée de deux brins d'ADN complémentaires, suggérait aussi un mécanisme de perpétuation de cette molécule au cours des générations successives. Ce travail exceptionnel fut récompensé du prix Nobel dès 1962. Au cours des décennies suivantes furent élucidés la structure fine des gènes >

> «normaux», la nature des lésions pouvant altérer leurs propriétés, la régulation de leur expression, le système de codage gènes/protéines, la réplication, etc. Progressivement, les liens entre la génétique et le monde du gène s'établirent, en particulier dans deux domaines de la médecine, les maladies rares et le cancer. L'ADN devint la vedette d'innombrables colloques et publications et la source de nombreux prix Nobel.

C'est aussi au cours de ces recherches que furent identifiées des molécules pouvant servir dans une ingénierie de l'ADN (enzymes de restriction, ligase, transcriptase inverse, PCR et, récemment, CRISPR-Cas9...). Progressivement, une caisse à outils très performante a permis l'essor, d'une part, d'une biologie moléculaire fondamentale où l'on isole, amplifie, caractérise un gène ou modifie le génome d'une cellule, d'un organe ou d'un organisme et, d'autre part, du génie génétique à vocation plus appliquée, en particulier *via* la création d'entreprises de biotechnologie. Des molécules-médicaments comme l'insuline, puis des anticorps, impossibles à synthétiser par voie chimique, devenaient aisés à produire industriellement par voie biologique grâce au caractère universel de l'ADN (un fragment d'ADN extrait d'une espèce peut être lu et utilisé par une autre espèce). Les expériences princeps de Griffith, Avery et leurs collègues avaient montré la voie.

## L'ÈRE DE LA GÉNOMIQUE

Il devint vite assez évident qu'une clé pour comprendre la machinerie du vivant, et en particulier l'évolution de l'ADN selon les espèces, résiderait dans notre capacité à déterminer l'ordre des éléments constitutifs d'un fragment et, mieux, d'un génome complet. Séquencer l'ADN devint un enjeu critique. De plus, la taille de nombreux génomes imposait de disposer de méthodes simples et rapides. Deux furent proposées dans la deuxième moitié des années 1970, l'une par le Britannique Frederick Sanger (déjà Prix Nobel en 1958 pour son travail sur la structure de l'insuline), l'autre par l'Américain Walter Gilbert. Et c'est ainsi qu'en 1977 fut séquencé le génome du phage. La méthode Sanger était née!

Ce premier génome était petit, mais l'ambition de séquencer des génomes plus complexes se fit jour au début des années 1980 et, en 1985, quelques scientifiques proposèrent de séquencer le génome humain. Ce projet pharaonique pour l'époque (durée prévue: 15 ans, coût: 3 milliards de dollars) démarra en 1990, associa 16 laboratoires dans le monde, dont le Genoscope d'Évry, et s'acheva en 2003 (en fait 2006). Au cours de cette période, les performances du séquençage ont évolué de manière fulgurante. Aujourd'hui, le séquençage d'un génome humain se fait en quelques jours – demain en quelques heures – pour 1 000 dollars. Dès lors, la connaissance d'un génome humain complet peut entrer dans la

pratique hospitalière de routine. C'est l'objectif du plan France Médecine Génomique 2025, lancé le 22 juin 2016. Répartis sur douze plateformes régionales, les moyens techniques permettront dans cinq à sept années de séquencer plusieurs centaines de milliers de génomes en oncologie et dans le domaine des maladies rares, puis dans tous les secteurs médicaux qui le nécessitent. Une nouvelle médecine dite de précision se dessine ainsi, où les technologies du numérique permettront d'intégrer toutes les données cliniques d'un patient et de comparer son dossier à des milliers d'autres afin d'affiner le diagnostic et le choix du traitement.

La génomique a par ailleurs ouvert des portes dans de nombreux secteurs et est d'ores et déjà



# Le Beagle s'appelle aujourd'hui Tara



à l'origine d'une bioéconomie qui bouleverse les modèles économiques et modifie les rapports de force entre pays. L'industrie pharmaceutique s'est investie dans les sciences du vivant pour utiliser des médicaments biosourcés ou produire des molécules chimiques complexes par biologie de synthèse, notamment en immunothérapie des tumeurs. La biotechnologie environnementale joue un rôle considérable dans la politique de développement durable. Décontamination des sites pollués, traitement et recyclage des déchets et des odeurs, traitement de l'eau, surveillance des agents pathogènes dans l'environnement font appel à des approches génomiques pour optimiser les procédures ou identifier les gènes et voies métaboliques impliqués. Agroalimentaire et agronomie, énergie et matériaux biosourcés, plastiques biodégradables, pâtes à papier, textiles, chimie verte constituent autant de domaines enrichis par l'apport des «omiques», que les techniques de synthèse de génomes ou de réécriture de séquences *in vivo* vont encore accélérer en posant de redoutables problèmes éthiques!

La métagénomique, inventaire des micro-organismes d'écosystèmes jusque-là totalement inconnus, nous ramène à l'époque des grandes explorations. Le *Beagle* s'appelle aujourd'hui *Tara*. Cette goélette parcourt les océans, collecte des échantillons de plancton et établit une cartographie mondiale de la répartition des micro-organismes marins – tout en participant à la surveillance des écosystèmes maritimes et à la lutte contre le réchauffement climatique. ■

## BIBLIOGRAPHIE

International Human Genome Sequencing Consortium, **Finishing the euchromatic sequence of the human genome**, *Nature*, vol. 431, pp. 931-945, 2004.

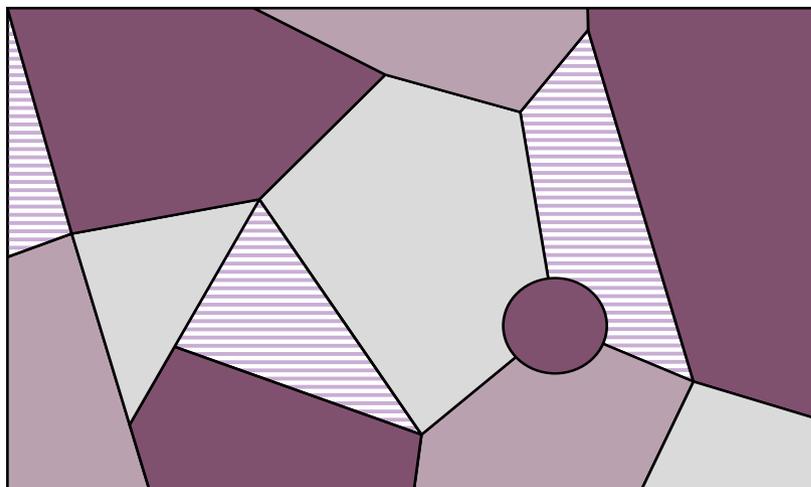
F. Sanger et al., **Nucleotide sequence of bacteriophage phiX174 DNA**, *Nature*, vol. 265, pp. 687-695, 1977.

## LE THÉORÈME DES QUATRE COULEURS EST DÉMONTRÉ

**E**n 1852, Francis Guthrie, mathématicien et botaniste sud-africain, a postulé que quatre couleurs suffisent à colorier n'importe quelle carte plane en s'assurant que deux pays ayant une frontière commune soient de couleurs différentes. Le résultat semblait d'autant plus évident que, bien souvent, trois couleurs suffisent et que, en 1890, une preuve simple a été trouvée pour cinq couleurs. Pourtant, pendant près d'un siècle, toutes les preuves que quatre couleurs suffisent se sont révélées fausses.

En 1977, à la suite des travaux de l'Allemand Heinrich Heesch, Kenneth Appel et Wolfgang Haken, de l'université de l'Illinois, ont démontré que s'il devait y avoir un contre-exemple, il appartiendrait à un ensemble de 1936 cas « critiques » possibles (plus tard réduit à 1478). Ils ont alors écrit un programme informatique qui a réussi – en tâtonnant – à colorier ces 1936 cas avec quatre couleurs seulement: une vérification impossible à la main et qui a pris à l'époque plus de 1200 heures de calculs! Le théorème des quatre couleurs était donc démontré? À voir...

Ce tout premier cas de preuve informatique consistant non pas à prouver un théorème par le raisonnement, mais à tester puis à rejeter un



nombre fini mais colossal de contre-exemples fit scandale à l'époque. En 2005, Georges Gonthier et Benjamin Werner, à l'Inria (Institut national de recherche en informatique et automatique), ont reproduit les résultats d'Appel et Haken à l'aide d'un logiciel assistant de preuve (où le raisonnement est formalisé dans ses moindres détails, de telle façon qu'il soit vérifiable par tous), mettant ainsi fin à la polémique. L'informatique est devenue depuis un outil légitime de la recherche et de la formulation de preuves en mathématique. ■

RENÉ CUILIERIER  
journaliste scientifique

K. Appel et W. Haken, *Illinois Journal of Mathematics*, vol. 21, pp. 429-490, 1977

Quatre couleurs suffisent pour colorier une carte de telle sorte que deux pays ayant une frontière commune soient toujours de couleurs différentes (en supposant que tous les pays sont faits d'un seul morceau, sans enclave).

## LA CRYPTOGRAPHIE À CLÉ PUBLIQUE VOIT LE JOUR

**D**epuis l'Antiquité, pour échanger des messages secrets, il fallait au préalable que l'auteur et son destinataire se mettent d'accord sur une méthode de chiffrement. Hélas, si un tiers interceptait cet échange, leurs efforts de discrétion étaient réduits à néant.

En 1976, Whitfield Diffie et Martin Hellman, alors à l'université Stanford, ont proposé l'idée d'une « cryptographie à clé publique » ou « asymétrique ». Une analogie illustre. Alice (le destinataire) envoie à Bernard (l'émetteur) un coffre ouvert (la clé publique) dont elle seule a la combinaison (la clé secrète). Bernard introduit le message dans le coffre, le ferme et le réexpédie à Alice qui est alors la seule à pouvoir y accéder, quand bien même le coffre serait intercepté avant

# 1 024

C'EST LE NOMBRE DE BITS QUI CODENT LES PLUS PETITES CLÉS PUBLIQUES ACTUELLES. CELA CORRESPOND À DES NOMBRES D'ENVIRON 256 CHIFFRES DÉCIMAUX.

de lui parvenir. Whitfield Diffie et Martin Hellman n'avaient pas donné d'algorithme mettant ce principe en pratique, mais, en 1978, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman y sont parvenus à partir de résultats de la théorie des nombres, ce qui a donné l'algorithme RSA. La fonction publique  $f$  qui produit le message chiffré,  $f(M)=C$ , est choisie de telle façon que  $f^{-1}$ , sa réciproque qui redonne le message initial,  $f^{-1}(C)=M$ , soit presque impossible à calculer. Dans l'algorithme RSA, la fonction est construite à partir de deux nombres premiers  $p$  et  $q$ , sachant qu'il est facile de les multiplier pour obtenir  $n=p \times q$ , mais que trouver les facteurs premiers  $p$  et  $q$  à partir de la seule connaissance de  $n$  nécessite un temps de calcul rédhibitoire si les entiers sont très grands.

La cryptographie asymétrique est aujourd'hui à la base de presque tous les échanges de données sécurisés sur Internet. ■

R. C.

R. L. Rivest et al., *Comm. of the ACM*, vol. 21(2), pp. 120-126, 1978

# 1979 La théorie des perspectives démasque l'irrationalité humaine

Les individus prennent-ils leurs décisions de façon rationnelle ? Oui, suppose la théorie économique orthodoxe. Pas toujours, montrent les psychologues, qui ont ébauché une cartographie de l'erreur humaine toujours féconde aujourd'hui.

**D**ans les années 1970, deux psychologues de l'université hébraïque de Jérusalem mirent sur pied un ensemble d'expériences qui firent date. Si les énoncés proposés aux participants avaient la forme anodine de problèmes de logique ou de probabilité, les expériences servaient en réalité un projet ambitieux. Leurs auteurs, Amos Tversky et Daniel Kahneman, cherchaient à éclaircir le fonctionnement de la pensée humaine et, par là, à répondre à la question fondamentale : l'homme est-il rationnel ?

Ces chercheurs ne sont certes pas les premiers à avoir exploré le sujet. Mais ils ont incontestablement joué un rôle dans ce questionnement et, durant les décennies qui nous séparent d'aujourd'hui, ont écrit l'une des pages les plus importantes des sciences humaines et sociales. La thèse constante qu'ils défendent est que la décision, en particulier lorsqu'elle est confrontée à l'incertitude, ne peut être décrite comme objectivement rationnelle. Cette position était originale, car la

conception alors dominante en psychologie était celle d'un homme rationnel qui cherche à maximiser l'utilité espérée d'une situation, une conception chère à l'économie orthodoxe. La théorie qu'ils établirent à partir de l'article fondateur de 1979 *Prospect theory: An analysis of decision under risk* a mis sérieusement en question ces idées dominantes ; elle valut à Daniel Kahneman le prix d'économie en mémoire d'Alfred Nobel, en 2002 (Amos Tversky est mort en 1999). Elle est connue aujourd'hui sous le nom de « théorie des perspectives ».

En fondant cette théorie, Daniel Kahneman et Amos Tversky ne cherchaient pas tant à provoquer un changement de paradigme en économie qu'à pointer des anomalies dans la description habituelle que faisait du jugement humain cette discipline. Ainsi, l'économie orthodoxe offrait une conception axiomatisée de la rationalité. Pour n'en prendre qu'un exemple, l'un des axiomes de ce modèle énonce que si A est préféré à B, et B à C, alors A doit être préféré à C. Dès 1969, Amos Tversky a montré qu'il ne correspondait pas toujours aux décisions des individus ou des groupes humains. >

## L'AUTEUR



**GÉRALD BRONNER**  
professeur  
de sociologie  
  l'université  
Paris-Diderot

Jeux de hasard, opérations financières, stratégie politique ou militaire, etc. : les décisions humaines sont souvent influencées par des perceptions erronées.



> Au-delà de ces critiques ciblées, c'est le modèle même de l'utilité espérée que la théorie des perspectives remet en question. Ce modèle tire ses racines historiques de la réponse que Pascal donna au chevalier de Méré lorsque ce dernier lui demanda s'il y avait une façon rationnelle de se conduire devant les jeux de hasard. Le philosophe répondit qu'en effectuant une moyenne des divers gains possibles pondérée par les probabilités correspondantes, on pouvait inférer la somme qu'il était raisonnable d'accepter de miser, ce qui définissait ainsi le calcul de l'espérance mathématique. Par exemple, le prix d'équilibre d'un billet de loterie qui vous propose de gagner 500 euros avec 1 chance sur 10 est de 50 euros.

Très vite, on s'aperçut cependant que cette solution posait un problème nommé paradoxe de Saint-Petersbourg. Énoncé notamment en 1713 par Nicolas Bernoulli, ce paradoxe montre que la logique ordinaire ne peut se résoudre à suivre les conseils du calcul mathématique. Supposons un jeu à pile ou face où l'on s'arrête lorsque le côté face est obtenu, et où le joueur gagne  $2^n$  euros si le côté face est obtenu au  $n$ -ième jet. La question est: quel coût d'entrée doit-on accepter de payer pour participer à ce jeu, sachant que la somme mise est définitivement perdue?

La plupart d'entre nous ne serions pas prêts à miser une somme importante, alors même que l'espérance mathématique du gain est infinie. Daniel Bernoulli (le cousin de Nicolas) proposa une réponse à ce paradoxe en 1738, en distinguant entre une somme d'argent et l'utilité de cette somme. Par utilité, on entend la valeur psychologique qu'un individu attribue à un objet ou à une ligne de conduite. Bernoulli souligna que l'utilité d'un petit accroissement de la richesse est inversement proportionnelle à la quantité des biens déjà possédés. Il identifiait ainsi, pour la première fois, ce que l'on nomme aujourd'hui en économie la décroissance de l'utilité marginale.

La théorie des perspectives a remis profondément en question la théorie de l'utilité espérée, qui avait longtemps permis de modéliser la décision humaine. Un simple exemple suffit à le faire comprendre. Si l'on propose de choisir entre deux options, gagner 900 euros ou avoir 90 % de chances de gagner 1000 euros, beaucoup choisiront la certitude de gagner plutôt que le pari. En revanche, si l'on propose de perdre 900 euros ou d'avoir 90 % de chances de perdre 1000 euros, beaucoup choisiront cette fois le pari, en parfaite contradiction avec la cohérence que suppose le modèle de l'utilité espérée.

Ainsi, la détermination de l'utilité psychologique ne dépend pas seulement de l'état de la richesse, mais aussi de la référence à partir de laquelle la décision sera prise. C'est

précisément l'un des trois points fondamentaux de la théorie des perspectives. L'exemple que Daniel Kahneman propose lui-même pour faire comprendre cette idée est celui de la perception sensorielle. La température subjective de l'eau ne sera pas évaluée de la même façon selon qu'on l'estime par rapport à un point de référence plus chaud ou plus froid. C'est pourquoi, par exemple, la différence subjective entre 900 et 1000 euros est beaucoup moins importante qu'entre 100 et 200 euros.

De la même façon, il existe une asymétrie psychologique entre les perspectives positives et négatives, ce dont ne rend pas compte la théorie de l'utilité espérée. Amos Tversky et Daniel Kahneman ont montré avec leurs expériences que, à l'évidence, les pertes ont plus d'impact

## Psychologiquement et en moyenne, il faut 2,50 euros de gain pour compenser 1 euro de perte

sur nos décisions que les gains équivalents. Autrement dit, pour la plupart d'entre nous, la peur de perdre 100 euros est plus intense que l'espoir d'en gagner 130. Ils ont même pu montrer qu'il faut en moyenne 2,50 euros de gain pour compenser 1 euro de perte.

La théorie des perspectives est-elle une véritable révolution scientifique au sens de Thomas Kuhn? Peut-être pas, car, comme l'a souligné avec beaucoup de sagesse Daniel Kahneman lui-même, le modèle de l'utilité espérée, malgré ses imperfections, rend encore de beaux services à la modélisation des phénomènes économiques.

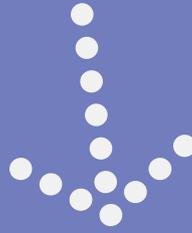
Au-delà de ce dialogue avec les sciences économiques orthodoxes, les deux psychologues ont engagé une cartographie de l'erreur humaine qui n'a pas fini de faire sentir ses influences dans l'ensemble des sciences humaines et sociales. Cette entreprise de caractérisation du jugement humain et de ses erreurs systématiques permet en effet de mettre au jour des invariants mentaux qui instruisent tout autant l'anthropologie que les sciences de l'éducation ou la sociologie contemporaine. Elle a même une influence notable sur l'originale et récente théorie du *nudge*, relative aux incitations indirectes et positives capables d'orienter notre comportement et nos décisions. ■

### BIBLIOGRAPHIE

R. Thaler et C. Sunstein, **Nudge**, Penguin Books, 2008.

A. Tversky et D. Kahneman, **Advances in prospect theory : Cumulative representation of uncertainty**, *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 5(4), pp. 297-323, 1992.

D. Kahneman et A. Tversky, **Prospect theory : An analysis of decision under risk**, *Econometrica*, vol. 47(2), pp. 263-292, 1979.



# Les conférences

Au Palais de la découverte Entrée libre dans la limite des places disponibles

Cycle de 5 conférences

> **Les samedis à 15h**

## ■ Vers le meilleur des mondes ?

**Robots enseignants, robots empathiques pour personnes âgées, commandes par la pensée... Vers quel monde mènent les machines à l'intelligence et à l'affection artificielles ?**

**18 novembre**

### Aux sources du numérique

Avec Emmanuel Lazard, maître de conférences en informatique à l'université Paris-Dauphine ; Pierre Mounier-Kuhn, historien, chercheur au CNRS et à l'université de Paris-Sorbonne.

**25 novembre**

### Quand les robots sèment le trouble

Avec Laurence Devillers, professeure à l'université Paris-Sorbonne IV et chercheuse au Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (Limsi) du CNRS, membre de la Cerna d'Allistène.

**2 décembre**

### Le numérique au secours du cerveau humain

Avec Olivier Colliot, chercheur au CNRS, responsable de l'équipe Aramis (équipe de recherche commune à l'Inria, l'université Pierre-et-Marie-Curie, l'Inserm et le CNRS), de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM).

**9 décembre**

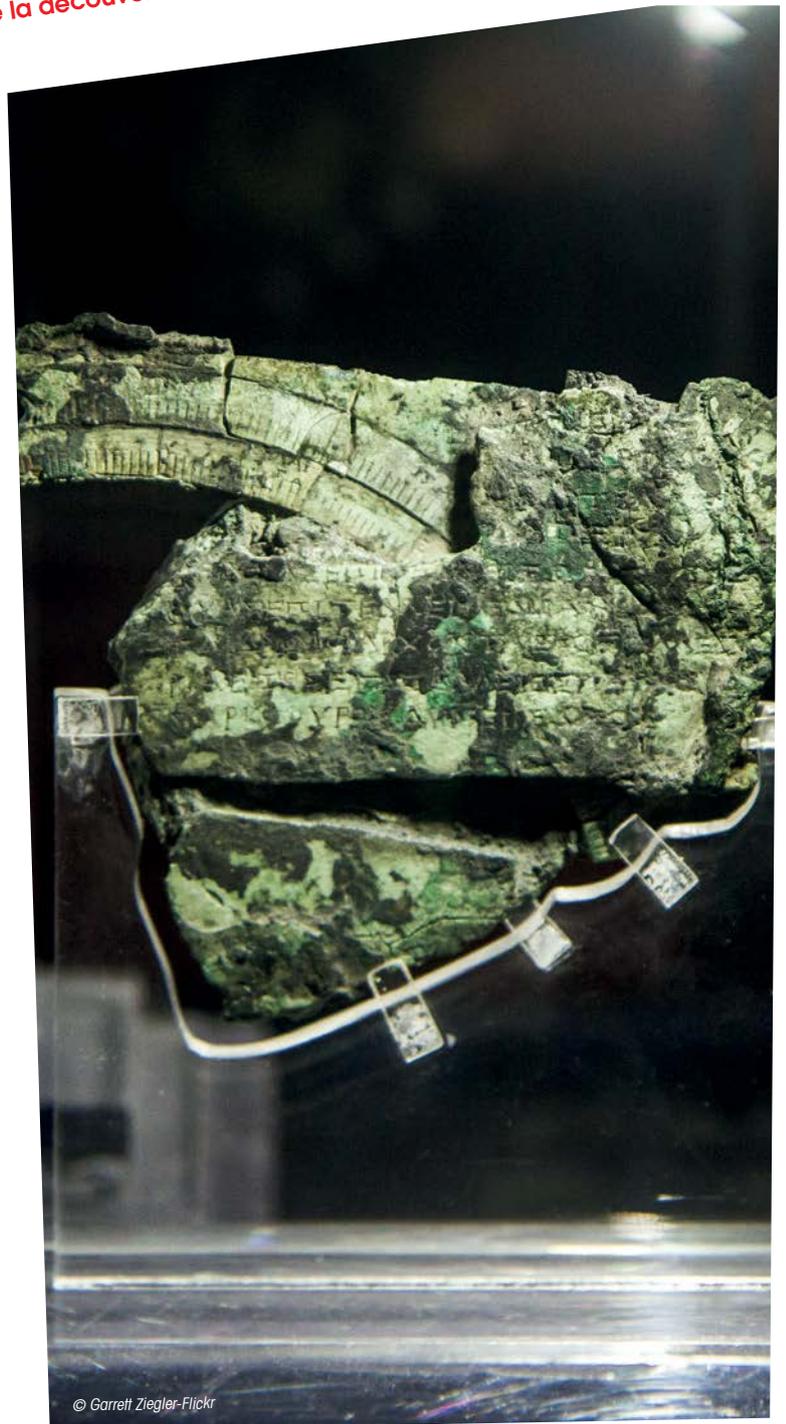
### Écrire à la vitesse de la pensée ?

Avec Fabrizio De Vico Fallani, chercheur de l'équipe Aramis, ICM.

**16 décembre**

### La preuve par les faits à l'ère du Big Data

Avec Claudine Schwartz, professeur des universités en mathématiques, à l'université Joseph-Fourier de Grenoble.



© Garrett Ziegler-Flickr

La machine d'Anticythère, premier calculateur analogique connu, trouvée en 1901 dans l'épave d'une galère romaine.

En partenariat avec



Avec le soutien de



1980

# L'astéroïde qui extermina les dinosaures

Il y a 66 millions d'années, plus de 70 % des espèces vivantes, dont les dinosaures, ont disparu de la surface du globe. Si l'hypothèse « météorite » explique cette extinction massive, elle a été longue à admettre.

**I**l y a environ 66 millions d'années, la vie sur Terre a connu une immense crise, avec une extinction massive d'espèces qui l'a fait changer d'ère: on est passé du Crétacé au Tertiaire. Les causes de cette crise restent discutées, mais l'une d'entre elles domine depuis que, le 6 juin 1980, la revue *Science* publia un article qui allait provoquer une véritable révolution dans les sciences géologiques et paléontologiques.

Ses auteurs étaient le physicien Luis Alvarez, son fils le géologue Walter Alvarez et les géochimistes Frank Asaro et Helen Michel, tous travaillant à Berkeley, en Californie. Ce qu'ils annonçaient au monde scientifique était d'abord une découverte tout à fait factuelle. En étudiant en détail la succession des couches

sédimentaires déposées en milieu marin lors de la transition entre le Crétacé et le Tertiaire, au voisinage de la ville italienne de Gubbio, ils avaient remarqué qu'une mince couche d'argile correspondant précisément à cette limite contenait une concentration énorme en iridium, un métal normalement très rare dans la croûte terrestre, mais beaucoup plus abondant dans certaines météorites.

Des analyses réalisées sur un niveau similaire au Danemark et en Nouvelle-Zélande montraient qu'il s'agissait d'un phénomène mondial. Pour l'expliquer, les chercheurs invoquaient la collision avec la Terre d'une énorme météorite (un astéroïde), d'un diamètre d'environ 10 kilomètres, dont les retombées auraient donné naissance au niveau enrichi en iridium.

## L'AUTEUR



**ERIC BUFFETAUT**  
paléontologue  
au CNRS, laboratoire  
de géologie de l'École  
normale supérieure  
(Paris)



Les conséquences de cet impact, cependant, allaient bien au-delà de l'anomalie géochimique, car la limite Crétacé-Tertiaire coïncide avec une extinction majeure : c'est à cette époque que disparaissent les dinosaures et bien d'autres organismes (on estime que près de 70% des espèces qui existaient à la fin du Crétacé se sont éteintes). Selon le groupe de chercheurs de Berkeley, l'impact météoritique était la cause de cette extinction massive, principalement parce que l'énorme quantité de poussière injectée dans la stratosphère aurait bloqué les rayons du soleil pendant plusieurs années. La surface du globe étant alors plongée dans l'obscurité, l'absence de photosynthèse aurait entraîné un effondrement des chaînes alimentaires, d'où l'extinction de nombreuses espèces, tant terrestres que marines.

© Mark Garlick / Gettyimages.com

## BIBLIOGRAPHIE

**E. Buffetaut, *Sommes-nous tous voués à disparaître ? Idées reçues sur l'extinction des espèces*, Le Cavalier Bleu, 2012.**

**Le monde des dinosaures, *Dossier Pour la Science*, n° 48, juillet-sept. 2005.**

**L. W. Alvarez et al., *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*, *Science*, vol. 208, pp. 1095-1108, 1980.**

Cette hypothèse proposait ainsi une explication plausible à ce vieux mystère qu'était la disparition des dinosaures. Pourtant, les réactions de la communauté scientifique furent très contrastées. Si beaucoup d'astronomes et de physiciens accueillirent favorablement cette explication étayée par des données concrètes et qui tenait compte du fait que les traces d'impacts météoritiques sont légion dans le Système solaire (l'exemple le plus parlant étant sans doute la surface de la Lune), beaucoup de géologues et de paléontologues se montrèrent sceptiques, voire hostiles.

En effet, l'idée d'un cataclysme d'origine extraterrestre allait à l'encontre du dogme régnant sur les sciences de la Terre depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, en réaction notamment aux idées de Cuvier sur les «révolutions du globe», dogme suivant lequel tout événement catastrophique devait être banni des tentatives d'explications des phénomènes géologiques et biologiques survenant à la surface de notre planète. Un phénomène extraterrestre paraissait particulièrement inacceptable à certains chercheurs.

Toutes les explications imaginables furent alors proposées, parfois avec une certaine mauvaise foi, pour trouver des causes purement terrestres à l'enrichissement en iridium. Dans la décennie 1980, la controverse battit son plein, avec une profusion d'articles contradictoires.

## L'IMPACT LOCALISÉ AU MEXIQUE

Alors que les indices géochimiques et minéralogiques en faveur d'un impact d'astéroïde s'accumulaient, un point d'interrogation demeurait : une aussi gigantesque collision aurait dû laisser un énorme cratère à la surface du globe. Il fallut un peu plus de dix ans pour que celui-ci fût localisé, à cheval sur la côte nord de la péninsule du Yucatán et sur le golfe du Mexique.

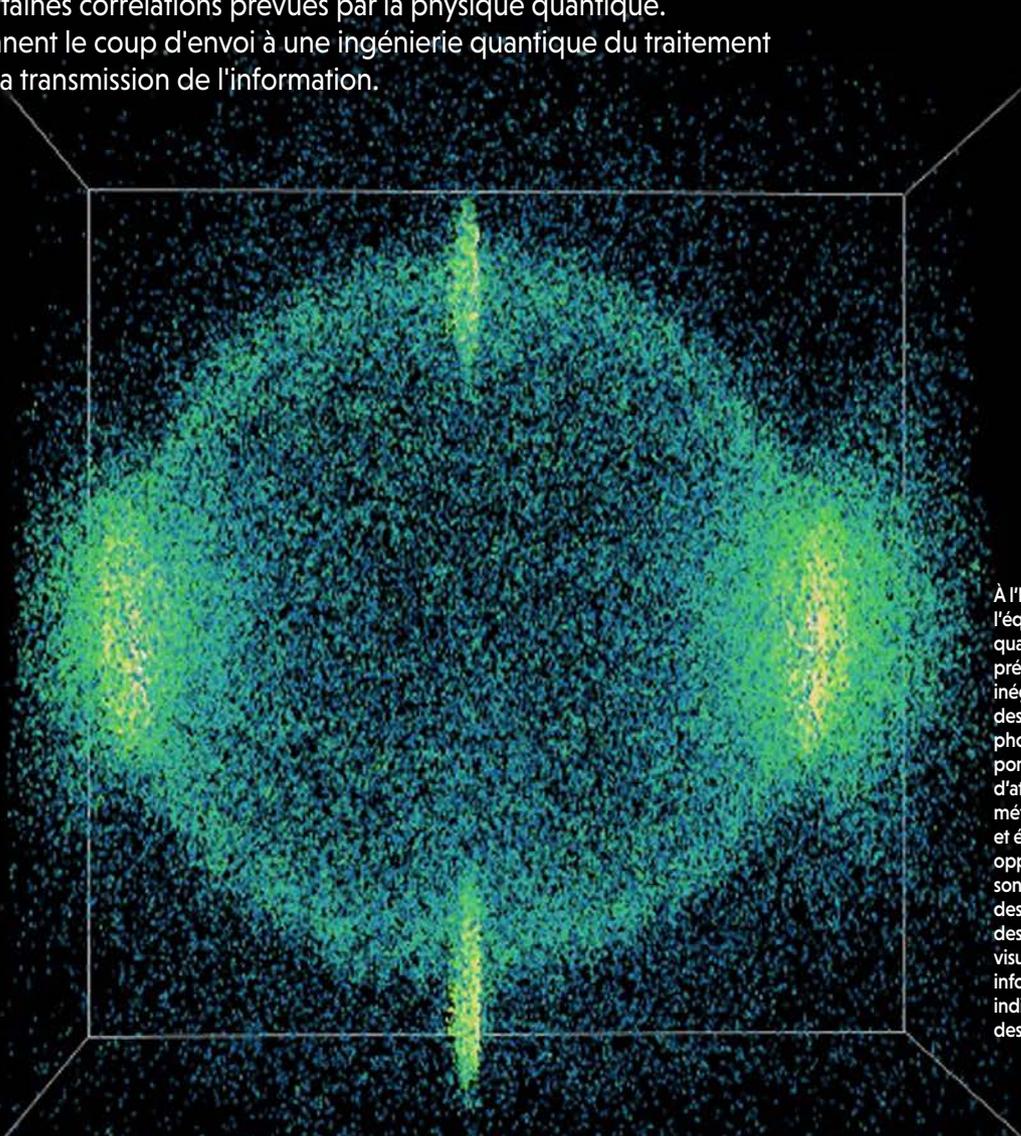
Cette immense structure géologique, dont le centre est comblé de sédiments et les bords arasés par l'érosion, n'a pu être découverte que grâce à des sondages et des études géophysiques (notamment sur les variations de la gravité), qui ont révélé un vaste cratère circulaire. Les études géologiques ont montré la présence de roches broyées typiques d'un impact météoritique et les datations indiquent que la formation du cratère est bien contemporaine de la couche enrichie en iridium et des extinctions de la limite Crétacé-Tertiaire.

Le cratère de Chicxulub, ainsi nommé d'après le nom maya d'une localité du Yucatán, est donc la trace laissée par la collision de l'astéroïde avec la Terre, qui provoqua il y a quelque 66 millions d'années une dévastation globale des écosystèmes et fut ainsi la cause de l'extinction en masse de la fin du Crétacé. La majorité des géologues et des paléontologues est désormais acquise à cette explication. ■

# 1982 Intrication quantique

## Le débat Bohr-Einstein tranché par l'expérience

Des tests expérimentaux démontrent en 1982 la nature non locale de certaines corrélations prévues par la physique quantique. Et donnent le coup d'envoi à une ingénierie quantique du traitement et de la transmission de l'information.



À l'Institut d'optique, l'équipe d'optique quantique atomique prépare un test des inégalités de Bell avec des atomes et non plus des photons. Les expériences portent sur des paires d'atomes d'hélium métastables intriqués et émis dans des directions opposées. Les corrélations sont déterminées à partir des distributions de vitesse des atomes, comme celle visualisée sur cette image informatique des atomes individuels dans l'espace des vitesses.

**A**lbert Einstein joua un rôle majeur dans la naissance de la physique quantique au tout début du xx<sup>e</sup> siècle. Mais il n'adhéra jamais à l'interprétation du formalisme quantique développée vers 1925 à Copenhague par Niels Bohr et ses disciples.

Einstein essaya d'abord de trouver une contradiction dans les relations d'incertitude de Heisenberg, qui concernaient le comportement de particules quantiques individuelles. Après les échecs de ces tentatives, contrées par Niels Bohr au congrès Solvay de 1927, il souleva en 1935 une nouvelle objection concernant cette fois des paires de particules. Avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il écrivit un article mettant en cause le caractère complet de la mécanique quantique.

Cet article se fondait sur le cas de deux particules dans un état quantique qualifié aujourd'hui d'intriqué, une situation dont Einstein et ses coauteurs venaient de découvrir la possibilité théorique. Dans cet état, le formalisme quantique prédit de fortes corrélations entre les résultats des mesures effectuées sur chacune des deux particules. Ces corrélations persistent même à des distances suffisamment grandes pour que les mesures ne puissent s'influencer mutuellement, sauf si cette influence s'exerce à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

## DES VARIABLES CACHÉES ?

Einstein ne pouvait accepter une telle «mystérieuse action à distance» («*spooky action at a distance*», en anglais), et il conclut que la seule interprétation raisonnable de ces corrélations consistait à admettre que chaque particule transporte avec elle, localement, les propriétés qui vont déterminer le résultat des mesures. Les deux particules ayant été préparées dans la même source, ces propriétés sont corrélées dès l'émission, et on ne s'étonne pas que les mesures soient elles-mêmes corrélées.

Pour raisonnable qu'elle soit, cette interprétation n'a aucune contrepartie dans le formalisme quantique, qui ne laisse pas de place pour des propriétés individuelles des particules intriquées, et Einstein conclut son article en suggérant qu'il faut donc compléter le formalisme quantique. Bohr s'opposa à cette conclusion, convaincu que le formalisme quantique perdrait sa cohérence interne si on lui ajoutait de nouveaux paramètres (nommés parfois «variables cachées»).

À ce stade, le conflit ne portait que sur l'interprétation des prédictions quantiques et ne remettait pas celles-ci en cause. La situation changea radicalement en 1964 lorsque le physicien John Stewart Bell, de la division théorique du Cern, à Genève, découvrit que

certaines prédictions de la mécanique quantique sont en contradiction avec la conception réaliste locale du monde défendue par Einstein, dans laquelle chaque particule porte, localement, un ensemble de paramètres définissant sa réalité physique. Il devenait alors possible de trancher entre les deux visions du monde à partir de mesures expérimentales.

Dans une telle expérience, deux photons sont émis par la même source et partent dans des directions opposées vers deux polariseurs éloignés l'un de l'autre (voir la figure page 33). Pour un état intriqué en polarisation, la mécanique quantique prédit que les résultats des mesures de polarisation sur les deux photons sont fortement corrélés. Dans l'esprit du réalisme local, il existe donc une propriété commune aux deux photons, attribuée lors de l'émission de la paire, et déterminant le résultat des mesures. Par un calcul élémentaire, Bell montra alors qu'il existe des contraintes sur les corrélations prévues par n'importe quel modèle réaliste local. Or ces contraintes, explicitées dans les fameuses «inégalités de Bell», ne sont pas respectées par les prédictions quantiques pour certains jeux d'orientations des polariseurs.

La découverte de Bell a déplacé le débat du domaine de l'épistémologie vers celui de la physique expérimentale: il suffit de mesurer les corrélations observées dans des orientations bien choisies pour savoir si elles sont en accord avec les prédictions quantiques, ou si au contraire elles respectent les inégalités de Bell et confirment le caractère réaliste local de la nature.

Il ne fallut que quelques années pour que soit conçu un schéma pratique de test des inégalités de Bell avec des photons. Entre 1972 et 1976, trois expériences furent menées dans les universités de Berkeley, Harvard et Texas A&M. Après quelques résultats contradictoires, les résultats convergèrent sur un accord avec la mécanique quantique, et une violation significative des inégalités de Bell. Mais ces expériences étaient loin du schéma idéal, et plusieurs échappatoires restaient ouvertes pour interpréter ces résultats par un modèle réaliste local, dans l'esprit des idées d'Einstein.

La première de ces failles, et, comme Bell l'a écrit, la plus fondamentale, est «l'échappatoire de localité». Il faut, pour démontrer les inégalités de Bell, supposer que la mesure par un polariseur n'est pas influencée par l'orientation de l'autre polariseur, éloigné du premier. Cette condition de localité est raisonnable, mais dans un débat où l'on envisage des phénomènes nouveaux, il serait préférable de fonder cette hypothèse sur une loi fondamentale. C'est ce que Bell avait proposé dès 1964, en faisant remarquer que si l'orientation de chaque polariseur était modifiée rapidement pendant que >

## L'AUTEUR



**ALAIN ASPECT**  
directeur  
de recherche  
émérite au CNRS  
et professeur  
à l'Institut d'optique  
et à l'École  
polytechnique,  
à Palaiseau

> les photons se propageaient de la source aux polariseurs, alors la causalité relativiste – le fait qu’aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière – empêcherait qu’un polariseur puisse « connaître » l’orientation de l’autre au moment de la mesure.

### LE VERDICT DE L'EXPÉRIENCE

C’est ce schéma que Philippe Grangier, Gérard Roger, Jean Dalibard et moi avons mis en œuvre à l’Institut d’optique en 1981-1982.

## L'Europe va investir des centaines de millions d'euros dans les technologies quantiques

Une première expérience, avec des polariseurs fixes, a conduit à une violation sans précédent des inégalités de Bell (par plus de 40 écarts-types). Puis nous avons développé des commutateurs optiques permettant de modifier toutes les 10 nanosecondes la direction de mesure de polarisation, alors que le temps de vol des photons entre la source et les polariseurs, séparés de 6 mètres, était de 20 nanosecondes. L’expérience donna des résultats sans ambiguïté : les inégalités de Bell étaient violées

même lorsque les orientations des polariseurs étaient modifiées pendant le temps de propagation des photons.

Ce résultat fut confirmé en 1998 par l’équipe de Greg Weihs et Anton Zeilinger, à Innsbruck, en Autriche. En utilisant des photons intriqués injectés dans des fibres optiques, ils purent placer les polariseurs à 400 mètres de la source, et choisir l’orientation du polariseur avec un générateur de nombres aléatoires, pendant le temps de vol des photons.

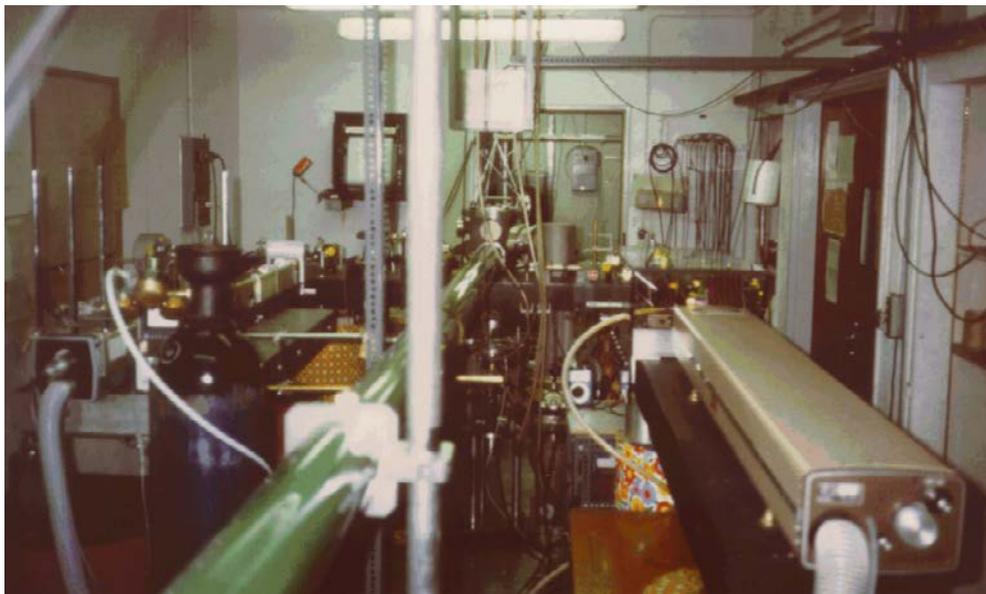
Au même moment, l’équipe de Nicolas Gisin, à Genève, utilisait le réseau commercial de fibres optiques de Swiss Telecom pour montrer que les photons restaient intriqués à plusieurs dizaines de kilomètres l’un de l’autre.

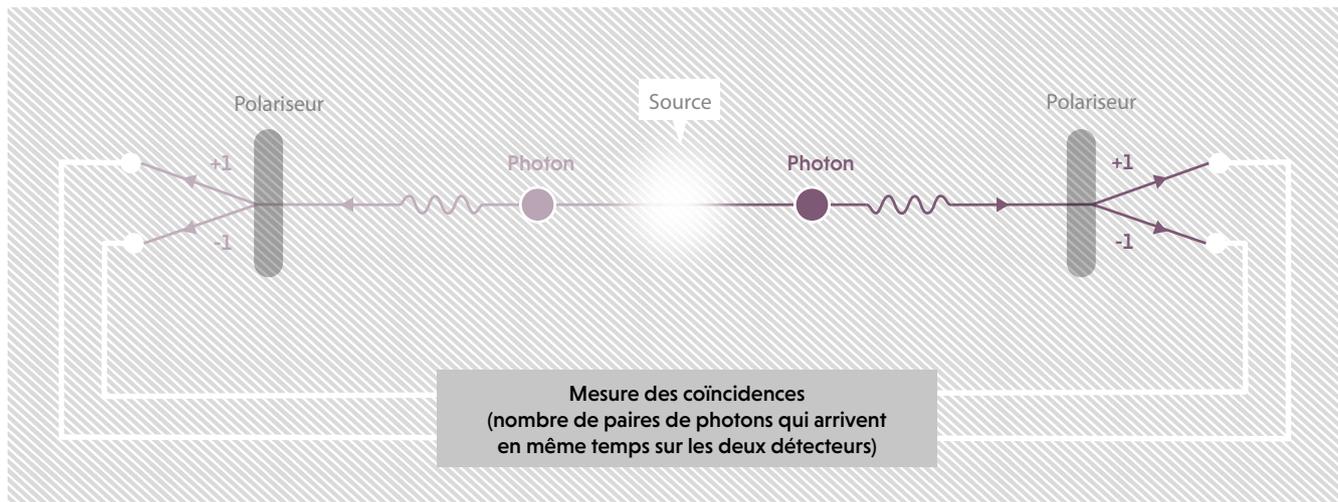
Mais il restait une échappatoire, moins fondamentale selon Bell, mais logiquement acceptable ; elle était liée au fait que, dans toutes ces expériences, les détecteurs n’enregistraient qu’une petite fraction des photons. L’interprétation des expériences exigeait alors d’admettre l’hypothèse de « l’échantillonnage représentatif », c’est-à-dire que l’ensemble des photons détectés donnait une représentation non biaisée de la totalité des photons. Le développement de détecteurs ayant des rendements proches de 100% a permis de clore sans ambiguïté cette échappatoire, en 2013.

Enfin, en 2015, trois équipes (celles de Ronald Hanson, à l’université de Delft, aux Pays-Bas, d’Anton Zeilinger, à l’université de Vienne, en Autriche, et de Lynden Shalm, au NIST de Boulder, aux États-Unis) ont réussi à fermer simultanément les deux échappatoires, mettant un point final au débat. La mécanique quantique sort victorieuse, et l’on doit renoncer à la vision réaliste locale du monde défendue par Einstein.

L’observation expérimentale de la violation des inégalités de Bell a eu deux conséquences

Cette photo d’époque montre le dispositif de l’expérience de 1982. On distingue les trois lasers utilisés pour exciter des atomes qui vont réémettre les paires de photons intriqués. Chaque photon se propage dans un tuyau destiné à éviter les perturbations dues aux turbulences de l’air, avant d’être soumis à la mesure de polarisation. On voit ici l’un de ces tuyaux (en vert), long de 6 mètres.





Dans les expériences de 1982 de l'équipe d'Alain Aspect, une source émet des paires de photons intriqués. Chaque photon est dirigé vers un dispositif qui en mesure la polarisation selon des directions qui sont modifiées pendant la propagation des photons. Les résultats des mesures simultanées (en coïncidence) sur les deux photons sont enregistrés et soumis au test de Bell.

importantes sur la physique des trois dernières décennies. L'une est conceptuelle: nous avons dû accepter la révolution quantique dans son aspect le plus contre-intuitif, la non-localité quantique. L'autre est plus concrète: nous avons assisté au développement de technologies quantiques fondées sur l'intrication, au cœur de la seconde révolution quantique.

C'est à Einstein lui-même, à son corps défendant, que nous devons l'idée de non-localité quantique. En 1949, dans sa réponse à Bohr dans le livre *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Einstein revient sur le raisonnement EPR. Il conclut que les seules façons de réfuter sa conclusion (que chaque particule, ou système – notés ici S1 et S2 –, a sa propre réalité physique locale) seraient «soit de supposer que la mesure sur S1 change (par télépathie [ce sont les mots écrits par Einstein, pour discréditer cette possibilité]) la situation réelle de S2, soit de refuser l'indépendance des situations réelles de deux systèmes séparés l'un de l'autre spatialement». Einstein raisonne ici par l'absurde et écrit que «les deux alternatives [lui] semblent inacceptables».

Mais après la violation expérimentale des inégalités de Bell, c'est à la conclusion d'Einstein qu'il faut renoncer, et on doit admettre l'une ou l'autre des deux hypothèses qu'il considérait absurdes, qui sont en fait deux façons de voir la non-localité quantique: (i) il peut y avoir une influence instantanée de la mesure en S1 sur le système séparé S2; (ii) les systèmes S1 et S2, bien que séparés spatialement, n'ont pas des situations réelles indépendantes. (Quand Einstein parle de séparation spatiale, il faut le comprendre au sens relativiste: aucun signal voyageant à une vitesse inférieure à celle de la lumière ne peut relier deux événements séparés spatialement.)

On peut faire remonter les premières idées sur les technologies quantiques à un article de Richard Feynman, au début des années 1980.

Prenant conscience du caractère extraordinaire de l'intrication, révélé par la violation des inégalités de Bell, il a suggéré qu'un ordinateur quantique, formé de bits quantiques intriqués, serait exponentiellement plus puissant que les ordinateurs classiques. Avec le développement de techniques expérimentales de plus en plus élaborées visant à maîtriser l'intrication, les premières démonstrations de calcul quantique élémentaire ont déjà été publiées.

## L'ÈRE DE L'INFORMATION QUANTIQUE

Par ailleurs, l'utilisation de sources de photons uniques ou intriqués, initialement développées pour tester les fondements de la mécanique quantique, a permis des démonstrations spectaculaires de transmission d'information dont la sécurité repose sur les fondements de la mécanique quantique: c'est la fameuse cryptographie quantique.

Aujourd'hui, la communauté européenne a décidé d'investir des centaines de millions d'euros dans le développement des technologies quantiques, en stimulant la collaboration entre laboratoires académiques et industriels, tandis que la Chine fait un effort analogue, voire plus important. Aux États-Unis, cette recherche est menée grâce aux sommes considérables investies par les compagnies privées Google, Intel, Microsoft, donnant l'exemple à des sociétés européennes, comme Atos, qui viennent de se lancer dans la course.

Quand on se retourne sur cette histoire, on voit une discussion sur les fondements être tranchée par des expériences, dont les succès ont stimulé les idées sur l'information, le calcul et la métrologie quantiques. Saurons-nous leur donner une forme utilisable pour des applications qui pourraient changer la société? La réponse sera expérimentale. Fondamentale ou appliquée, la science a besoin des expériences pour progresser. ■

## BIBLIOGRAPHIE

A. Aspect, **Le débat Einstein-Bohr est clos**, *Dossier Pour la Science*, n° 93, oct.-déc. 2016.

A. Aspect *et al.*, **Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 91-94, 1982.

A. Aspect *et al.*, **Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 1804-1807, 1982.

N. Bohr, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 48, pp. 696-702, 1935.

A. Einstein *et al.*, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777-780, 1935.

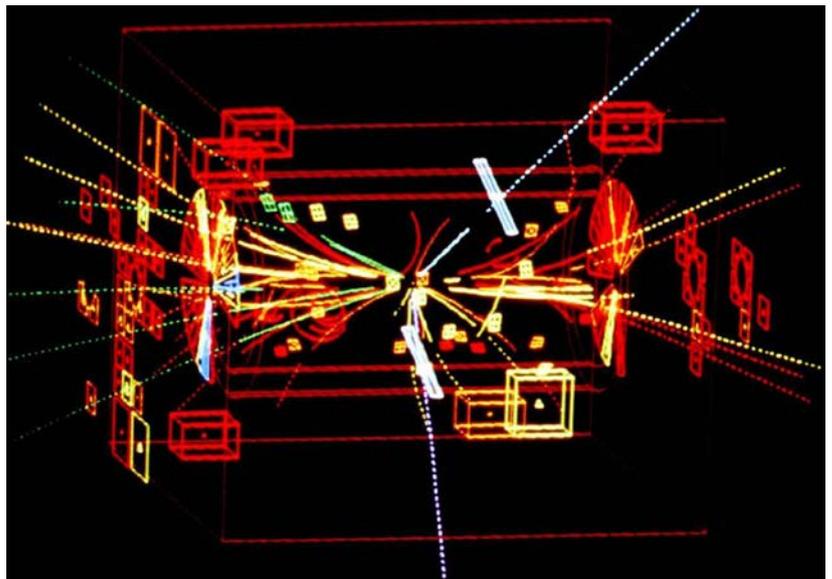
# LES BOSONS W ET Z MIS EN ÉVIDENCE

**D**epuis l'unification de l'électricité et du magnétisme par Maxwell en 1861, l'idée que les forces de la nature n'en font qu'une anime les physiciens. En outre, à partir des années 1940, on a commencé à comprendre que les particules fondamentales constituant la matière – les «fermions» – s'attirent et se repoussent en échangeant des particules nommées «bosons» qui véhiculent les forces de la nature: l'électromagnétisme, la gravitation, l'«interaction forte», qui lie les composants des noyaux atomiques, et l'«interaction faible», responsable de certaines désintégrations radioactives.

En vertu des principes de la physique quantique, les bosons qui véhiculent les forces ont une durée de vie inversement proportionnelle à leur masse, et seuls ceux de masse nulle (comme le photon, médiateur de la force électromagnétique) vivent assez longtemps pour transmettre une force à longue portée. L'interaction faible ayant une portée limitée, on devait supposer que ses bosons associés étaient au contraire «lourds».

Par ailleurs, à partir de 1950, une élégante théorie fondée sur des symétries dites de jauge promettait de déterminer les autres propriétés des bosons. L'idée est la suivante. Le monde physique obéit à des symétries globales – des opérations qui, si on les applique à l'Univers tout entier, ne le changent pas (comme de le translater entièrement de trois mètres vers la gauche, par exemple). En revanche, la même opération appliquée différemment en chaque point provoque des changements notables. Les bosons apparaissent comme les ingrédients nécessaires pour qu'une symétrie globale donnée soit aussi locale [dans le cas de l'électromagnétisme, par exemple, il s'agit d'une symétrie associée à une structure mathématique, le groupe noté  $U(1)$ ]. Seul bémol, comme ces bosons ont pour rôle de compenser partout les effets d'un changement local, la théorie leur attribuait à tous une masse nulle, en contradiction avec ce que l'on savait de la force faible, par exemple.

Dans les années 1960, reprenant les travaux du Brésilien José Leite Lopes, le Pakistanais Abdus Salam et les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg ont proposé que les forces faible et électromagnétique n'en forment qu'une: la force électrofaible, issue d'une symétrie de



Reconstruction numérique de la désintégration d'un boson Z en un électron et un positron enregistrée par les détecteurs de l'équipe UA1 le 30 avril 1983. Il s'agit là de la première détection d'un Z par UA1.

# 10

**C'EST LE NOMBRE DE BOSONS W QUI AVAIENT ÉTÉ DÉTECTÉS PAR LES ÉQUIPES UA1 ET UA2 LORS DE L'ANNONCE OFFICIELLE DE LEUR DÉCOUVERTE LE 25 JANVIER 1983. LA MISE EN ÉVIDENCE DU BOSON Z SERA COMMUNIQUÉE LE 1<sup>ER</sup> JUIN DE LA MÊME ANNÉE.**

jauge fondée sur le groupe noté  $SU(2) \times U(1)$ . Elle était transmise par quatre bosons: le photon et trois autres particules de masse nulle. Steven Weinberg a alors ajouté à ce modèle un mécanisme proposé en 1964 par plusieurs physiciens, dont le Britannique Peter Higgs: en supposant l'existence d'un champ (le champ dit de Higgs) qui encombre le vide et «gêne» le déplacement des trois bosons, ceux-ci acquièrent une masse. En 1973, l'expérience Gargamelle au Cern donna un premier indice de l'existence du boson Z. Suivi d'autres observations, ce résultat persuada les physiciens de la validité du modèle standard.

En 1983, ces indices, en faveur de la description unifiée des forces fondamentales, furent confirmés par la production et la détection des bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et Z lors de collisions proton-antiproton au Cern. Ce succès éclatant du «modèle standard» de la physique des particules a été récompensé l'année suivante par le prix Nobel, attribué à Carlo Rubbia et Simon van der Meer. Cependant, le mécanisme de Higgs prévoyait l'existence d'une particule – le boson de Higgs – qui restait encore à découvrir (voir l'article de Pierre Fayet pages 90-91)... ■

R. C.

Collaboration UA1, *Physics Letters B*, vol. 122(1), pp. 103-116, 1983; Collaboration UA2, *Physics Letters B*, vol. 122 (5-6), pp. 476-485, 1983

## DÉCOUVERTE DE L'HOMÉOBOÎTE

**C**omment, lors du développement d'un embryon, une cellule au départ unique donne-t-elle naissance à un organisme entier? Qui ordonne à tel ou tel groupe de cellules de former un membre ou un œil? On a découvert progressivement au xx<sup>e</sup> siècle que certains gènes «architectes» provoquent l'activation en cascade d'autres gènes subordonnés afin de former des structures spécifiques. Mais il y a plus.

En 1983, de façon indépendante, Matthew Scott et Amy Weiner, à l'université de l'Indiana, et William McGinnis, alors à l'université de Bâle, en Suisse, sous la direction de Walter Gehring, ont mis en évidence que ces gènes du développement

ont tous un point commun: une séquence de 184 nucléotides, nommée homéoboîte ou boîte homéotique. Cette séquence code un morceau de protéine particulier: une sorte de «tête de lecture» capable d'agir sur l'ADN en activant un gène cible. Grâce à cette observation, les généticiens ont commencé à comprendre comment les gènes du développement agissent à l'échelle moléculaire.

Les chercheurs ont ensuite montré que cette séquence est conservée à travers le règne animal (on la retrouve chez les vertébrés, les arthropodes et les échinodermes). L'universalité de l'homéoboîte dans un même organisme et à travers les espèces suggère que ces gènes

sont apparentés: ce sont tous les copies mutées et recollées d'un même gène ancestral probablement apparu chez les eucaryotes il y a environ un milliard d'années. Sachant qu'une seule mutation d'un de ces gènes chez la mouche, par exemple, la dote de deux paires d'ailes au lieu d'une, on comprend que ces mutations et répliquations ont permis à l'évolution de produire des plans d'organisation très variés à partir d'un petit nombre de mutations. Reconstituer cette histoire est désormais le sujet d'une nouvelle discipline, la biologie évolutive du développement ou évo-dévo. ■

R. C.

W. McGinnis *et al.*, *Nature*, vol. 308, pp. 428-433, 1983

## LE VIRUS DU SIDA IDENTIFIÉ

**E**n 1981, la recrudescence d'infections associées à l'effondrement des défenses immunitaires alerta les autorités sanitaires américaines: l'épidémie de sida venait de commencer. Dès juin 1982, l'étude de 19 cas dans la communauté homosexuelle du sud de la Californie – communauté où les pratiques sexuelles sont discutées ouvertement – permit de déterminer, par une série d'interviews, que la cause de la

maladie était probablement un agent transmis sexuellement.

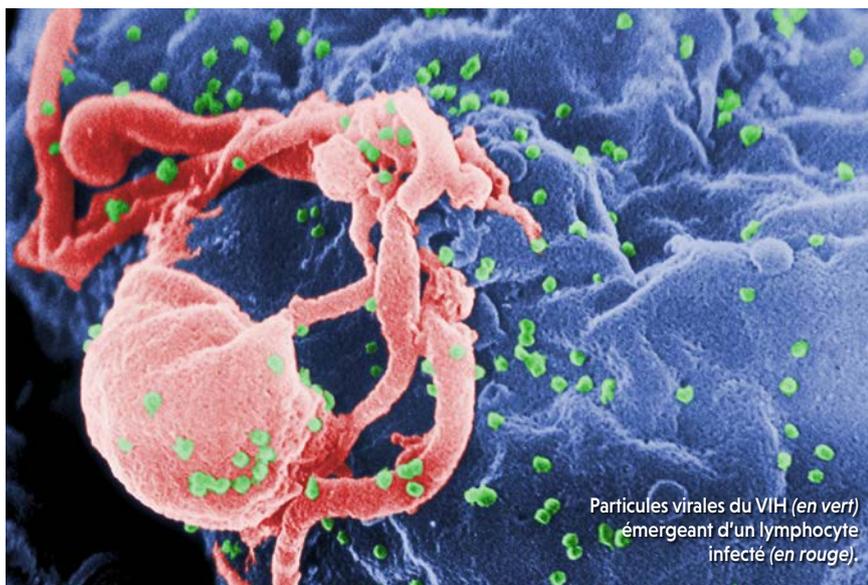
Robert Gallo, découvreur du premier rétrovirus humain (HTLV-1) en 1974, suggéra alors qu'il s'agissait d'un rétrovirus. Le matériel génétique d'un rétrovirus est porté par des brins d'ARN qui doivent être «traduits» en ADN avant d'être lus par la cellule infectée. Certains de ces pathogènes (les lentivirus) ont une période d'incubation très longue, ce qui

semblait correspondre à l'agent recherché. Mais persuadé qu'il s'agissait d'une version mutée de HTLV-1, Robert Gallo ne parvint pas à l'isoler.

À partir de l'identification des premiers cas en France, Luc Montagnier, Françoise Barré-Sinoussi et Jean-Claude Chermann, de l'institut Pasteur, eurent l'idée d'étudier des prélèvements effectués sur des patients en phase pré-sida (de façon à ne pas détecter un virus opportuniste arrivé après l'effondrement des défenses du patient) dans les ganglions lymphatiques (puisque l'agent semblait s'attaquer aux lymphocytes du système immunitaire). En janvier 1983, ils détectèrent une activité de traduction d'ARN en ADN et, en février, ils observèrent le rétrovirus. En 2008, le prix Nobel de médecine fut attribué à Luc Montagnier et Françoise Barré-Sinoussi pour l'identification du VIH, le virus de l'immunodéficience humaine. À partir de l'identification du virus, les chercheurs ont pu étudier comment combattre la maladie. Aujourd'hui, il existe de nombreux antirétroviraux qui agissent à différentes étapes du cycle de réplication du VIH. Les trithérapies contrôlent l'infection sans pour autant éradiquer le virus. Elles prolongent l'espérance de vie des malades. ■

R. C.

F. Barré-Sinoussi *et al.*, *Science*, vol. 4599, n° 220, pp. 868-871, 1983



Particules virales du VIH (en vert) émergent d'un lymphocyte infecté (en rouge).

1985

# Les fullerènes, nouvelle forme du carbone

La découverte de la molécule  $C_{60}$ , le « footballène », a donné le coup d'envoi à tout un champ des nanosciences. Avec une riche moisson dont font aujourd'hui partie les nanotubes et le graphène.

**D**ans la nature, le carbone existe à l'état solide sous deux formes cristallines bien connues de tous: le graphite et le diamant. Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de Chine, crayon à mine). Le diamant est au contraire un minéral transparent, le plus dur des matériaux naturels.

Cette situation a été bouleversée en 1985: avec leurs collègues, le Britannique Harold Kroto et les Américains Richard Smalley et Robert Curl découvraient cette année-là une nouvelle forme d'organisation du carbone, la molécule  $C_{60}$ , ce qui leur a valu le prix Nobel de chimie en 1996. C'était l'aboutissement de recherches entamées au début des années 1980 pour mieux comprendre les mécanismes de formation de longues chaînes de carbone dans l'espace interstellaire.

Ces études les ont conduits à vaporiser du graphite à l'aide d'un laser et à identifier, dans la suie formée, des molécules très stables et constituées de 60 atomes de carbone, disposés aux sommets d'un polyèdre régulier de 0,7 nanomètre de diamètre et dont les facettes sont 20 hexagones et 12 pentagones (*voir la figure page ci-contre*). Cette molécule rappelle irrésistiblement un ballon de football et a été nommée footballène, ou buckminsterfullerène par référence au dôme construit par l'architecte américain Buckminster Fuller pour une exposition universelle au Canada.

Des molécules cages plus grosses ont également été identifiées:  $C_{70}$ , puis  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ , etc. Elles sont toujours constituées de 12 pentagones,

mais d'un nombre supérieur d'hexagones. Toutes ces molécules inauguraient la famille dite des fullerènes.

À la suite de ces expériences, des fullerènes ont été mis en évidence en 1997 dans un minéral naturel, la shungite, et en 2010 dans une nébuleuse planétaire, validant ainsi la démarche expérimentale entamée dans les années 1980. Aujourd'hui, les fullerènes sont étudiés et utilisés pour leurs propriétés chimiques, de conduction électrique et de lubrification, notamment dans les domaines de la pharmacie, de la cosmétique ou de l'électronique.

À ce stade, on pourrait penser l'histoire achevée. En réalité, comme on va le voir, elle ne fait que commencer, car la découverte des fullerènes a ouvert la voie à de nouvelles classes de matériaux à base de carbone et de basse dimensionnalité, d'un grand intérêt pour les nanosciences.

À la suite des expériences initiales de Kroto et ses collègues, l'Allemand Wolfgang Krätschmer et l'Américain Donald Huffman ont mis au point en 1990 un procédé de synthèse du  $C_{60}$  simple à mettre en œuvre, ce qui a permis de produire rapidement les quantités nécessaires à l'étude des propriétés physico-chimiques du matériau.

Le procédé avait cependant une bien plus grande portée que cet objectif. En effet, en 1991, le physicien japonais Sumio Iijima a eu la curiosité d'observer au microscope électronique un sous-produit de synthèse qui se présentait comme un dépôt noirâtre dur et filamenteux. Il découvrit ainsi les nanotubes de carbone, des objets tubulaires fermés à leurs

## L'AUTEURE



**ANNICK LOISEAU**  
physicienne au  
Laboratoire d'étude  
des microstructures,  
unité mixte  
CNRS-Onera,  
Châtillon

extrémités et constitués de carbone cristallisé. Leur diamètre est de l'ordre de 1 à 5 nanomètres, pour des longueurs atteignant parfois plusieurs dizaines de centimètres. Ce « rapport d'aspect » en fait des objets unidimensionnels (1D), par contraste avec les fullerènes qui sont des objets dépourvus de dimension (0D) aux échelles du micromètre et au-delà.

Comparés au graphite, les nanotubes ont une structure singulière. Le graphite est formé d'un empilement de plans, dont chacun constitue du « graphène » : un réseau plan et régulier d'hexagones dont les sommets sont occupés par un atome de carbone (comme pour les hexagones de la molécule  $C_{60}$ ).

La filiation est encore plus évidente pour le nanotube de carbone, qui équivaut à une feuille de graphène enroulée sur elle-même. L'angle d'enroulement est une propriété capitale, qui détermine les propriétés des porteurs de charge et confère au nanotube un caractère métallique ou semi-conducteur. De ce fait, les nanotubes présentent une palette très large et très singulière de propriétés électroniques, optiques, thermiques, chimiques et mécaniques. Des propriétés qui découlent à la fois de la liaison carbone-carbone du graphite, de l'abaissement de dimensionnalité et de l'angle d'enroulement.

## DIMENSIONNALITÉ 0, 1 OU 2

Plus globalement, les nanotubes de carbone sont la structure de basse dimensionnalité la plus étudiée et ont accompagné le développement des recherches fondamentales en nanosciences. Aujourd'hui, ils connaissent de nombreuses applications, mais souvent très spécialisées. La difficulté à contrôler lors de la synthèse la structure des tubes, qui conditionne leurs propriétés, reste aujourd'hui un frein au développement d'applications de grande échelle, en électronique notamment.

Quant au graphène, qui est un matériau bidimensionnel (2D), on pensait qu'il était physiquement impossible d'obtenir sous une forme stable un matériau de cette nature. Mais en 2004, à l'université de Manchester, Konstantin Novoselov et Andre Geim ont réussi à isoler du graphène de façon très simple, en exfoliant mécaniquement de façon répétée des fragments de graphite jusqu'à en obtenir un seul plan atomique (*voir page 76*). La simplicité de l'expérience ainsi que les connaissances acquises sur les nanotubes, tant sur le

plan théorique qu'expérimental et technologique, ont permis un essor très rapide des recherches sur le graphène. La mise en évidence de ses propriétés électroniques particulières, dues notamment à la bidimensionnalité, ont valu à Konstantin Novoselov et Andre Geim le prix Nobel de physique en 2010.

Le graphène est le premier représentant de la classe nouvelle de matériaux 2D qui s'obtiennent à partir de matériaux lamellaires tels que le nitrure de bore hexagonal, les dichalcogénures de métaux de transition, le « phosphore noir », le silicène, etc. Alors que le graphène est métallique, ces matériaux sont des semi-conducteurs dont les propriétés optiques dans le domaine visible-infrarouge sont attractives et singulières. De plus, il est techniquement possible de les combiner et obtenir ce qu'on appelle des hétérostructures, aux propriétés variées selon les composants choisis. Un champ de recherches qui explose littéralement depuis une petite dizaine d'années.

Ainsi, depuis 1985, le carbone ne finit pas de nous étonner. Dimensionnalité 0 avec les fullerènes, 1 avec les nanotubes, 2 avec le graphène... : les nanosciences et leurs applications ont largement de quoi se nourrir et grandir. ■

Le footballène ( $C_{60}$ ) est une molécule en forme de cage sphérique constituée de 60 atomes de carbone. Les liaisons interatomiques dessinent 12 facettes pentagonales et 20 facettes hexagonales. Cette molécule a une taille d'environ 0,7 nanomètre.

## BIBLIOGRAPHIE

R. B. Mathur et al., **Carbon nanomaterials**, CRC Press, 2017.

H. W. Kroto et al.,  **$C_{60}$  : Buckminsterfullerene**, *Nature*, vol. 318, pp. 162-163, 1985.

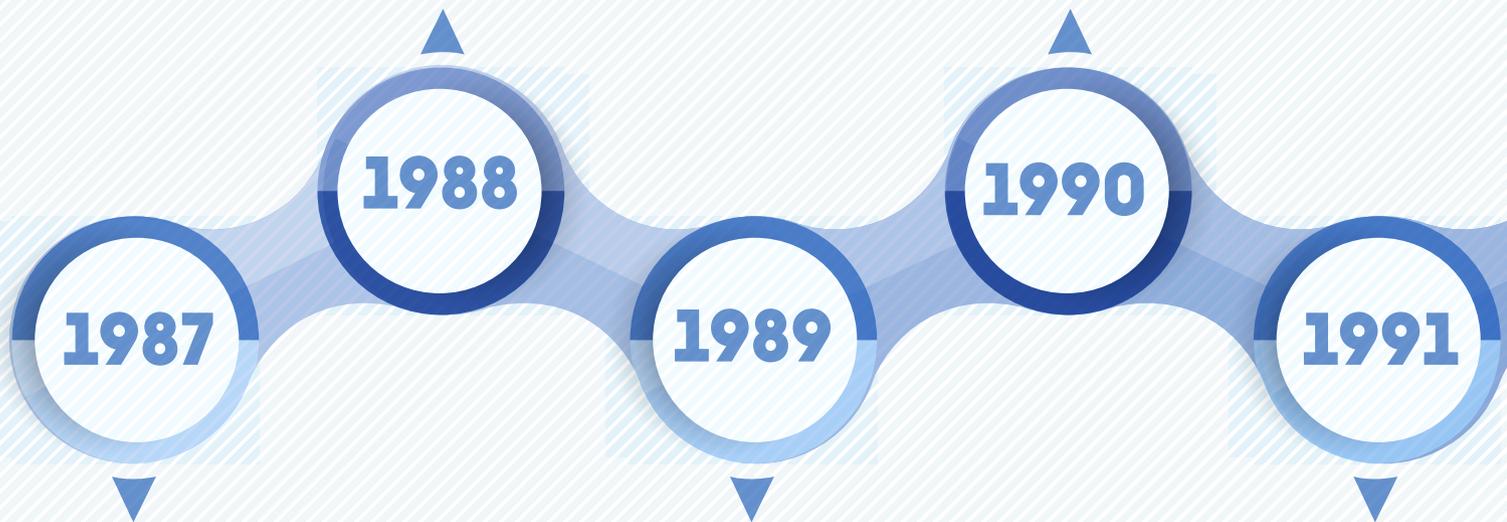
# 1987



- Mise en évidence de l'effet de **magnétorésistance géante**
- Création du **Giec** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
- L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) explicite une définition de la **biodiversité**

© Shutterstock.com

- Développement de la technique de l'**IRM fonctionnelle** du cerveau **p. 44**
- Le télescope spatial **Hubble** est mis en orbite
- Démarrage du **Projet génome humain**
- Alain Connes publie son livre sur la **géométrie non commutative**



- Débuts de l'**épigénétique**: le généticien Robin Holliday décrit les changements héréditaires des gènes qui ne modifient pas la séquence d'ADN **p. 40**
- Prix Nobel pour la découverte de **supraconducteurs à haute température** **p. 42**
- Alim Louis Benabib et ses collègues appliquent la **stimulation cérébrale profonde**, pour traiter des troubles du mouvement dus à la maladie de Parkinson

- Obtention de **souris knock-out**, chez lesquelles un ou plusieurs gènes ont été inactivés
- **Manipulation d'un atome unique** sur une surface à l'aide d'un microscope à effet tunnel
- Le **gène CFTR**, dont les mutations sont responsables de la **mucoviscidose**, est isolé

© Cynoclub/Shutterstock.com

- Introduction du terme **perturbateur endocrinien** pour désigner tout agent chimique qui influe sur l'équilibre hormonal de l'organisme
- Description d'une famille de près de 1000 gènes liés aux **récepteurs olfactifs**
- Premiers tests de communication du **téléphone portable GSM**
- Découverte dans les Alpes d'**Ötzi**, un homme momifié dans la glace il y a 5300 ans
- Ouverture du serveur **arXiv** de prépublications en ligne

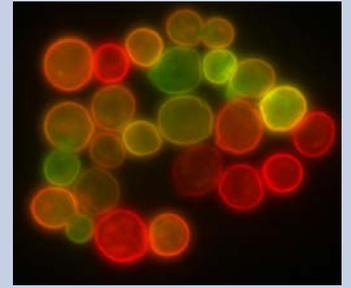


# 1996

- Giacomo Rizzolatti et ses collègues découvrent des **neurones miroirs** dans l'aire F5 du cortex prémoteur du singe
- Premier bébé conçu par **fécondation *in vitro* avec micro-injection** (technique ICSI)
- La **carte électronique de paiement à puce** est diffusée en France

- Identification d'un gène impliqué dans le cancer du sein, le **gène BRCA1** p. 50
- Découverte de la **grotte Chauvet** p. 51
- Peter Shor conçoit un algorithme de factorisation des nombres entiers pour un **ordinateur quantique**
- Commercialisation du premier **smartphone** (IBM Simon)

- Découverte des **récepteurs de l'immunité innée** p. 56
- Dolly, le premier **mammifère cloné**
- Premier séquençage complet du **génomme d'un eucaryote**, la levure *Saccharomyces cerevisiae*



1992

1993

1994

1995

1996

- Le **Web** entre dans le domaine public p. 48
- Identification du gène responsable de la **maladie de Huntington**
- Synthèse de **nanotubes de carbone** monofeuillets

- Publication de la preuve complète du grand **théorème de Fermat** p. 52
- Découverte d'**exoplanètes** autour d'une étoile ordinaire par Michel Mayor et Didier Queloz p. 54
- Obtention de la **condensation de Bose-Einstein** d'une assemblée d'atomes p. 54
- Mise en évidence du **quark top** par les expériences CDF et D0 à Fermilab
- Edward Witten énonce sa **théorie M**, unifiant ainsi les cinq théories des cordes déjà existantes

## EDITH HEARD

dirige l'unité de génétique et biologie du développement (CNRS UMR3215/INSERM U934) et l'équipe Épigenèse et développement des mammifères à l'institut Curie, à Paris, et est professeure au Collège de France, titulaire de la chaire Épigenétique et mémoire cellulaire.

1987



# L'épigénétique s'est enfin imposée

Des modifications de l'expression des gènes qui ne changent en rien la séquence d'ADN, mais qui sont hérissables d'une cellule à ses filles, voire de parent à enfant... Tel est l'objet de l'épigénétique, discipline qui ne cesse de bouleverser la biologie depuis la fin des années 1980. L'éclairage d'Edith Heard.

## Qu'est-ce que l'épigénétique ?

Le mot « épigénétique » est né à l'instigation du biologiste britannique Conrad Waddington. En 1942, il a tenté de réunir deux mondes de la biologie: d'un côté, après la redécouverte des lois de Mendel, en 1901, les généticiens exploraient la fonction des gènes chez la drosophile; de l'autre, les embryologistes recherchaient comment, à partir d'un œuf fécondé, on arrivait à un organisme complexe. Waddington a émis l'hypothèse que le développement embryonnaire mobilisait des réseaux changeants d'interactions entre gènes. Et il a donné à l'étude des mécanismes en jeu le nom d'« épigénétique », fusion des termes « épigénèse » et « génétique ». L'épigénèse désignait l'idée d'Aristote selon laquelle un organisme vivant se développe à partir d'une cellule simple en se complexifiant peu à peu. Ses partisans venaient de remporter une longue bataille contre ceux de la préformation – l'idée que les spermatozoïdes ou les ovules contenaient déjà de petits êtres préformés.

Mais l'utilisation du terme « épigénétique » a stagné. À la fin des années 1950, à l'institut Pasteur, à Paris, François Jacob et Jacques Monod ont découvert chez les bactéries un mécanisme de régulation de l'expression des gènes par interaction d'une molécule avec une région spécifique de l'ADN, et les embryologistes se sont lancés sur cette voie. Christiane Nüsslein-Volhard et Eric Wieschaus, à l'EMBL, à Heidelberg, ont ainsi montré que chez la drosophile, des facteurs dits de transcription mettent en place le programme de développement, mais personne ne parlait d'épigénétique.

## Comment a-t-on pris conscience de l'importance des phénomènes épigénétiques ?

Au cours du xx<sup>e</sup> siècle, on s'est aperçu qu'en culture, les cellules provenant de différents tissus se divisaient sans perdre leur identité. Comment gardaient-elles cette mémoire? D'autant qu'en 1962, John Gurdon, à l'université d'Oxford, avait prouvé que le noyau d'une cellule somatique (c'est-à-dire non germinale) contient toute l'information génétique pour produire n'importe quelle cellule (il avait créé une grenouille en transplantant le noyau d'une cellule intestinale dans un ovocyte énucléé). C'était la preuve que chaque cellule de l'organisme contient le même génome. Comment, alors, était enregistrée l'identité d'une cellule si ce n'était pas dans le génome?

Or à la même époque, des biologistes ont découvert une modification de l'ADN, nommée méthylation, qui ne touche pas sa séquence, mais ajoute une étiquette sur une de ses quatre bases. On détectait un certain profil de méthylation sur les gènes, qui ne changeait pas au fil des divisions cellulaires et était associé à une expression plus ou moins importante de ces gènes. Cette méthylation était-elle la mémoire recherchée?

C'est ce qu'ont proposé l'Américain Art Riggs et le Britannique Robin Holliday en 1975, et tout a convergé dans les années 1980 grâce à divers résultats: des cellules traitées avec un inhibiteur de la méthylation perdaient parfois leur identité; et la méthylation pouvait expliquer des phénomènes qui ne suivaient pas les règles classiques de la génétique, comme l'empreinte parentale (l'expression différentielle des gènes hérités du père et de la mère) et l'inactivation du chromosome X (les femelles en ont deux copies génétiquement identiques, mais une seule s'exprime). L'explication s'est révélée exacte par la suite.

En 1987, Holliday a introduit le terme « épimutation » pour décrire les changements héréditaires des gènes non dus à une modification de la séquence d'ADN et, en 1994, il a redéfini l'épigénétique comme l'étude des changements d'expression des gènes transmissibles au fil des divisions cellulaires, voire des générations, sans changement de la séquence d'ADN. Dès lors, l'épigénétique s'est enfin imposée.

## Qu'a-t-elle apporté ?

On a compris que les marques épigénétiques (la méthylation et d'autres trouvées ensuite) jouent un rôle majeur dans la régulation de l'expression des gènes. Par exemple, beaucoup de gènes impliqués dans le cancer codent des facteurs qui modifient ces marques. Des mutations de ces facteurs peuvent changer tout l'épigénome d'une cellule et avoir un effet néfaste sur son identité et sa capacité à se diviser ou à interagir avec son environnement. Une autre grande découverte est liée à celle de Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto, qui lui valut le prix Nobel en 2012 avec John Gurdon. En 2006, il a montré que quatre facteurs de transcription suffisent pour reprogrammer une cellule somatique en cellule embryonnaire, mais le processus était très inefficace. Aujourd'hui, on sait qu'en modifiant les marques épigénétiques, on facilite la reprogrammation: on parle d'une barrière épigénétique protégeant l'identité cellulaire.

On se rend compte aussi que ces processus de mémoire cellulaire sont importants au cours du développement: on retrouve l'épigénétique de Waddington! Enfin, il s'avère que les marques épigénétiques contrôlent une partie de ce que l'on nommait jusqu'à récemment l'ADN poubelle: des éléments transposables qui peuvent se déplacer dans le génome. Ces éléments attirent les marques et, quand on supprime celles-ci, ils bougent en modifiant l'expression des gènes... Serait-ce un mécanisme de régulation fine des gènes, voire d'évolution rapide en réponse à un stress? Il s'agit à présent de trouver le lien entre hérédité, programme génétique, développement et épigénétique. Je suis convaincue que les éléments transposables y jouent un grand rôle. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

## BIBLIOGRAPHIE

E. Heard, **Épigénétique et mémoire cellulaire**, Collège de France/Fayard, 2013.

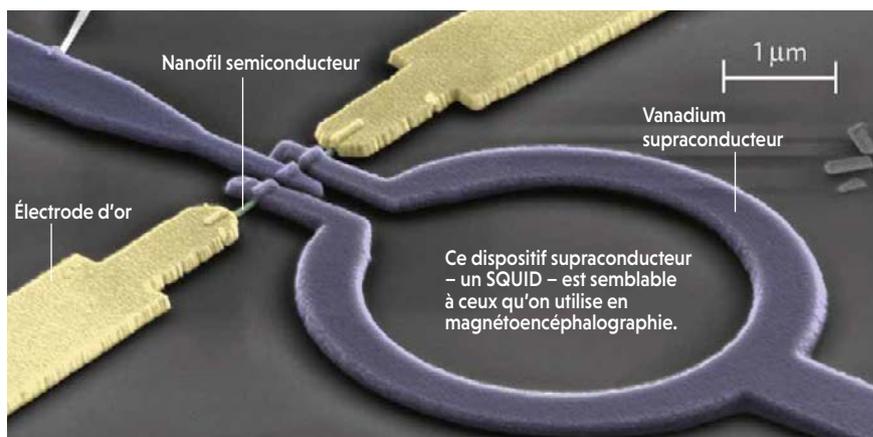
E. Heard, **Épigénétique, développement et hérédité**, Cours 2012-2013, Collège de France, [bit.ly/2fD1q5y](http://bit.ly/2fD1q5y)

R. Holliday, **The inheritance of epigenetic defects**, *Science*, vol. 238, pp. 163-170, 1987.

# LA SUPRACONDUCTIVITÉ À HAUTE TEMPÉRATURE

**E**n dessous d'une température critique très basse – de l'ordre de quelques kelvins ou degrés au-dessus du zéro absolu –, certains matériaux perdent toute résistance électrique. Ces matériaux, dits supraconducteurs, non seulement laissent passer le courant sans résistance, mais «repoussent» tout champ magnétique qui tente de les imprégner. Comme l'émission laser, cette propriété est un des rares phénomènes quantiques observables à notre échelle.

Jusqu'en 1986, les modèles théoriques suggéraient que cette propriété avait peu de chances d'apparaître au-dessus de 30 kelvins ( $-243^{\circ}\text{C}$ ). C'est alors que Johannes Bednorz et Alex Müller, du laboratoire de recherche IBM, à Zürich, établirent qu'une céramique dite YBCO (un oxyde de cuivre, baryum et yttrium) était supraconductrice à une température étonnamment élevée – 77 kelvins ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) – aisément atteignable à l'aide d'azote liquide. Les deux chercheurs reçurent le prix Nobel pour leur découverte l'année suivante.



Trente ans plus tard, aucune céramique de ce type n'a encore dépassé les 135 kelvins de température critique – et le rêve d'un matériau supraconducteur à température ambiante semble toujours aussi loin. De plus, le mécanisme qui explique ce type particulier de supraconductivité est loin d'être bien compris. En revanche, les matériaux supraconduc-

teurs à haute température sont à la base de capteurs magnétiques extrêmement sensibles – les SQUID – désormais indispensables en recherche fondamentale comme en imagerie médicale. ■

R. C.

J. G. Bednorz et K. A. Müller, *Zeitschrift für Physik B*, vol. 64(2), pp. 189–193, 1986.

**LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM**

Partagez les savoirs

Entrée gratuite

**CONFÉRENCES-DÉBATS**

**Cycle 15 000 ans d'interactions entre l'Homme et l'animal**

Avec J.-D. Vigne, archéologue des interactions hommes-animaux et de la domestication, directeur de la DGD REVE au Muséum

**Judi 23 novembre - 18h** : La biodiversité façonnée par les humains  
**Judi 30 novembre - 18h** : Entrée en familiarité : la domestication  
**Judi 7 décembre - 18h** : Du loup au chien

**Grand Amphithéâtre du Muséum - 57 rue Cuvier, Paris 5<sup>e</sup>**

**Cycle France-Colombie : une histoire humaine et naturelle en partage**

**Lundi 6 novembre - 18h** : L'Eldorado n'était-il qu'un mythe ?  
Avec P. Núñez-Regueiro, conservateur du patrimoine, responsable de l'unité patrimoniale des collections des Amériques, Musée du quai Branly-Jacques Chirac et A. Delpuech, conservateur général, directeur du Musée de l'Homme

**Lundi 13 novembre - 18h** : La météorite de Santa Rosa : quand les cieux pleuvent du fer  
Avec E. Jacquet, maître de conférences au Muséum, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie

**Lundi 20 novembre - 18h** : Planchon et Triana : une collaboration scientifique à l'origine de la première Flore de Colombie  
Avec M. Jeanson, responsable de l'Herbier national, Muséum et L. Raz, botaniste, professeure associée à l'UNAL

**Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire Paris 5<sup>e</sup>**

**MÉTIERS DU MUSÉUM**

**Dimanche 26 novembre - 15h** : Cosmochimiste  
Avec E. Jacquet

**Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution**  
36 rue Geoffroy St-Hilaire Paris 5<sup>e</sup>

**Au Jardin des Plantes**

Détails sur [mnhn.fr](http://mnhn.fr), rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

**POUR LA SCIENCE**

Tous les papiers se recyclent,  
alors trions-les tous.

**C'est aussi  
simple à faire  
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage  
des papiers avec Ecofolio.



# 1990 L'IRM fonctionnelle dévoile les secrets du cerveau

Avec la technique d'imagerie de l'IRM fonctionnelle, il est enfin possible d'observer le cerveau en action. Et de comprendre comment notre encéphale voit, entend, mémorise, raisonne, s'émeut... et se trompe.

**L**es progrès en imagerie cérébrale ont été une révolution dans le domaine des neurosciences. En particulier, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, ou IRM fonctionnelle, montre le cerveau «en action». Cette méthode d'imagerie est née à partir de 1990 grâce aux travaux du Japonais Seiji Ogawa, des laboratoires Bell, aux États-Unis. Il en a établi le principe et démontré l'efficacité expérimentale.

Mais en quoi consiste l'imagerie par résonance magnétique? Cette technique repose sur un phénomène physique: la résonance magnétique nucléaire (RMN), découverte en 1938 par le physicien américain Isidor Isaac Rabi. Certains atomes présentent un moment magnétique nucléaire, ou spin. C'est le cas notamment de l'hydrogène, constituant de la molécule d'eau qui représente jusqu'à 80% de la composition du cerveau. Lorsque ces atomes sont plongés dans un champ magnétique intense, leur spin s'aligne avec ce champ. En envoyant des impulsions électromagnétiques en radiofréquences, on perturbe cet alignement. Et le retour à l'état initial aligné s'accompagne d'une émission électromagnétique à des fréquences

très précises. Grâce aux progrès fulgurants de l'informatique et de l'électronique durant les années 1970 et 1980, il est devenu possible d'appliquer cette technique à un patient placé dans un fort champ magnétique. Les chercheurs mesuraient les ondes émises lors du réalignement des spins et, en traitant les données, reconstituaient une image fine des tissus mous du corps du patient, et notamment de son cerveau. On parle d'IRM anatomique.

## LE CERVEAU EN ACTION

Ces images de la structure des organes sont cependant statiques. Pour voir le cerveau en action, Seiji Ogawa s'est appuyé sur un résultat connu depuis 1936, obtenu par le chimiste américain Linus Pauling et son compatriote Charles Coryell: l'hémoglobine du sang présente des propriétés magnétiques différentes selon qu'elle est oxygénée ou non. Or, d'après les travaux des Britanniques Charles Roy et Charles Sherrington (qui reçut le prix Nobel en 1932 pour ses travaux sur les neurones), l'activité métabolique dans le cerveau s'accompagne d'une variation de l'afflux sanguin: les neurones des régions sollicitées pour accomplir une tâche cognitive ont besoin de plus de glucose (sucre) et d'oxygène

## L'AUTEUR



**OLIVIER HOUDÉ**  
professeur de psychologie à l'université Sorbonne-Paris-Cité, directeur du LaPsyDÉ (CNRS)



pour fonctionner. En 1990, Seiji Ogawa a montré qu'en principe, il était possible de mesurer les perturbations de l'activité magnétique de l'hémoglobine sur le signal IRM. En mesurant cet effet, il devenait dès lors envisageable de mettre en évidence les zones du cerveau sollicitées lorsque l'individu effectue une action, ou plus exactement une opération mentale.

Deux ans plus tard, avec la collaboration de Ken Kwong, John Belliveau, Bruce Rosen et d'autres au département de radiologie du Massachusetts General Hospital, Seiji Ogawa a confirmé l'efficacité de cette technique. En l'utilisant sur un individu soumis à des stimulations visuelles, l'équipe a montré que le signal IRM dans le lobe occipital, déjà connu pour son rôle dans la vision, dépendait de l'oxygénation du sang – on parle de signal Bold (pour *Blood Oxygen Level Dependent* en anglais). Avec cette technique de l'IRM dite fonctionnelle, on voyait bien le «cerveau en action»!

En pratique, les perturbations magnétiques de l'hémoglobine sont de faible intensité. On ne peut dès lors les mettre en évidence et les mesurer qu'en présence d'un aimant très puissant. Dans les dispositifs d'IRM utilisés aujourd'hui, le champ magnétique est

## L'IRM fonctionnelle a une résolution spatiale de l'ordre du millimètre

typiquement de 1,5 à 3 teslas, soit 60 000 fois le champ magnétique terrestre.

L'IRM fonctionnelle n'est pas la seule technique hémodynamique d'imagerie cérébrale. La tomographie par émission de positrons (TEP) a aussi été développée dans les années 1990. Dans le cas de la TEP, on mesure le débit sanguin cérébral dans différentes régions du cerveau par le biais de la concentration d'un traceur portant un atome radioactif injecté au patient (la dose très faible de radioactivité artificielle est sans danger). En se désintégrant, l'atome émet un positron qui s'annihile immédiatement avec un >

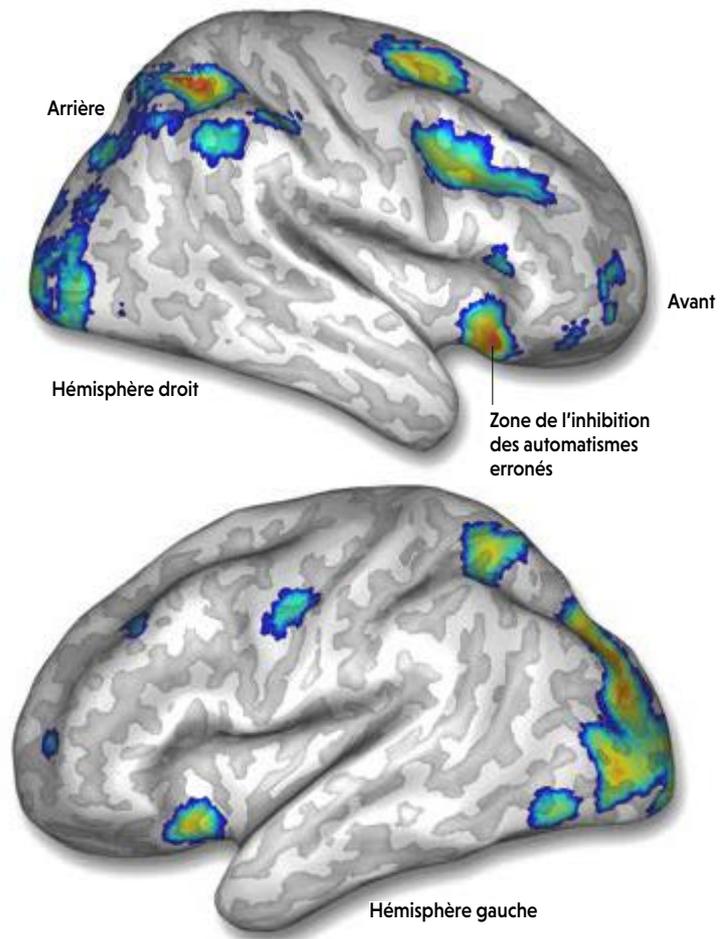
> électron environnant dans l'organisme. Des photons sont alors produits et leur détection permet de déterminer leur point d'origine dans le cerveau. Cette technique, en choisissant le bon traceur, est très efficace comme outil de diagnostic, notamment pour identifier des tumeurs.

L'IRM fonctionnelle présente cependant l'avantage d'être non invasive et indolore (car sans injection), contrairement à la TEP. C'est pour cette raison qu'elle est, depuis le début des années 2000, la technique d'imagerie la plus utilisée dans le domaine des neurosciences cognitives. Par ailleurs, la résolution (précision) spatiale de l'IRM fonctionnelle est très bonne, de l'ordre du millimètre. Sa résolution temporelle, cependant, est de l'ordre de la seconde, ce qui n'est pas toujours suffisant en psychologie expérimentale. Afin d'obtenir, en complément, une résolution temporelle maximale (en millisecondes), on utilise d'autres techniques (la magnétoencéphalographie ou l'électroencéphalographie à haute densité).

Le champ des applications de l'IRM fonctionnelle est vaste. Elle est par exemple utilisée pour étudier la perception, la mémoire, le raisonnement, la conscience, les émotions, etc. d'un point de vue cognitif chez l'adulte sain. Il est aussi possible de suivre le début et la progression de maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer. Autre application, avant une opération chirurgicale délicate du cerveau, l'IRM fonctionnelle peut être utilisée pour localiser les régions du langage et de la motricité du patient. Ou pour un diagnostic après un choc crânien.

## NEUROÉDUCATION

Dans des laboratoires, tel que le mien, nous nous intéressons à la question des apprentissages à l'école (lecture, mathématiques, raisonnement, etc.), ainsi qu'à la psychologie du développement du cerveau d'enfants d'âge préscolaire et scolaire. C'est le domaine de la « neuroéducation » ou « neuropédagogie ». Il s'agit de comprendre comment les apprentissages sont contraints par les lois de fonctionnement du cerveau – que les professeurs doivent donc connaître – et, en retour, comment l'environnement, l'école en particulier, ou telle pédagogie, telle méthode, telle pratique modifient et font progresser le cerveau des enfants. On observe, par exemple, qu'en apprenant à des élèves à surmonter (inhiber) leurs automatismes erronés, les enfants progressent bien mieux qu'en utilisant d'autres méthodes (par l'explication uniquement logique et rationnelle du problème ou par la simple répétition de la tâche). Pour apprendre à un enfant à inhiber ses erreurs, il faut utiliser un jeu attentionnel « d'attrape pièges » où il doit glisser sous une zone hachurée (zone d'inhibition) les cartons-réponses correspondant aux automatismes erronés. C'est ce



signal stop dont le cerveau a besoin. Un exemple d'erreur classique est la phrase: « Elle les manges. » L'enfant apprend en général qu'après l'article « les », il doit mettre un « s » au mot suivant. Ainsi, pour ne pas faire cette faute, l'enfant doit inhiber ce réflexe. Autre exemple, en mathématiques, l'enfant confond parfois le nombre des éléments à compter et l'espace occupé par ces éléments. Il doit alors inhiber le réflexe longueur=nombre. Que se passe-t-il dans le cerveau des enfants avant et après apprentissage de l'inhibition? L'IRM fonctionnelle (voir la figure ci-dessus) met très bien en évidence que, suite à cet apprentissage, l'enfant active des régions préfrontales qui sont dédiées au contrôle attentionnel, en plus des autres régions du cerveau (par exemple pariétales pour le nombre et le comptage).

Pour le futur, un centre comme celui de NeuroSpin à Saclay, près de Paris, vient de se doter d'un instrument d'IRM de 11,7 teslas, le plus puissant du monde en recherche humaine! Les chercheurs espèrent ainsi trouver l'existence d'un code neural et mieux comprendre le développement du cerveau, ainsi que les pathologies neurologiques. Mais les meilleurs progrès scientifiques viendront peut-être, avec l'IRM 3 teslas, déjà utilisée dans beaucoup de laboratoires, de l'ingéniosité des expériences psychologiques elles-mêmes afin de mieux comprendre comment le cerveau change en fonction des émotions, des situations sociales et des cultures. ■

Sur ces images d'IRM fonctionnelle, lorsque l'enfant a appris à inhiber ses erreurs, des zones préfrontales (à l'avant du cerveau) s'activent en plus des zones pariétales du nombre à l'arrière du cerveau.

## BIBLIOGRAPHIE

O. Houdé et al., **Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children**, *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 110, pp. 332-346, 2011.

S. Ogawa et al., **Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation [...]**, *PNAS*, vol. 89, pp. 5951-5955, 1992.

S. Ogawa et al., **Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation**, *PNAS*, vol. 87, pp. 9868-9872, 1990.



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

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

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

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**nature**

POUR LA  
**SCIENCE**

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec  
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

[www.academia-net.org](http://www.academia-net.org)

1993

# Le Web

## une utopie à défendre

Conçu initialement au Cern pour faciliter le travail des chercheurs, le Web a largement dépassé ce cadre. Aujourd'hui omniprésent dans notre quotidien, il continue d'évoluer. Une évolution que les citoyens doivent contrôler, faute de quoi les principes fondateurs de ce réseau seront dévoyés.

**E**n 1993, le laboratoire européen de physique des particules, le Cern, renonce à ses droits d'auteur sur ses logiciels du World Wide Web. Le grand public découvre alors la «toile d'araignée mondiale» – un réseau de textes, tableaux, images, sons, vidéos, etc. connectés les uns aux autres. Ce réseau a été conçu au Cern quelques années plus tôt, vers 1990, par deux informaticiens, le Britannique Tim Berners-Lee et le Belge Robert Cailliau, pour faciliter l'échange d'informations entre les chercheurs du monde entier. Le Web s'appuie sur un réseau d'ordinateurs déjà ancien à l'époque, puisqu'il datait de 1969: le réseau Internet.

Initialement, le Web est une simple collection de textes en langues naturelles auxquels on accède par le réseau Internet. Ces textes sont exprimés dans un format nommé HTML, qui permet de les mettre en page et de les structurer, par exemple en définissant des titres et des sous-titres. Mais, et c'est le point essentiel, le format HTML permet aussi de définir des ancres sur lesquelles le lecteur peut cliquer et qui conduisent à d'autres pages HTML. Il n'est donc plus nécessaire de connaître la localisation d'un texte pour y accéder: il suffit de cliquer sur l'ancre correspondante dans un autre texte. Le lecteur peut alors partir d'une adresse qu'il connaît, par exemple [www.bnf.fr](http://www.bnf.fr), et butiner de page en page au gré de son humeur.

L'idée est simple, mais la prouesse est inouïe: en 2017, quatre milliards de personnes sont connectées au réseau Internet et peuvent ainsi accéder à tous les contenus du Web. Il faut

imaginer les millions de lignes de programme des serveurs web qui publient des données, des serveurs internet qui routent ces données à travers le réseau Internet et des navigateurs qui permettent d'y accéder. Tout cela fonctionne en dépit de l'hétérogénéité des matériels et des logiciels utilisés par l'ensemble des utilisateurs.

Le volume des données numériques doublerait tous les 18 mois. Le Web est la partie émergée de cette *terra data*, celle visible depuis n'importe quel ordinateur, téléphone, tablette... connecté au réseau. Le Web met à portée de clics pratiquement toutes les connaissances, toute la culture, toute la vie sociale de la planète.

Dans les années qui ont suivi sa naissance, le Web a mené rapidement à d'autres inventions. Tout d'abord, il s'est enrichi d'autres formats permettant de publier non seulement des textes, mais aussi des images, des sons, des vidéos ou des données structurées.

### NAVIGUER SUR LA TOILE

Sont apparus ensuite les moteurs de recherche qui aident à découvrir de l'information dans cet océan de données. L'utilisateur choisit quelques mots-clés et le moteur de recherche trouve en quelques instants les pages qui contiennent ces mots. En ce sens, ce n'est

### LES AUTEURS



**SERGE ABITEBOUL**  
chercheur à l'Inria,  
membre de l'Académie  
des sciences



**GILLES DOWEK**  
chercheur à l'Inria



rien de plus qu'un index, mais un index sur une collection gigantesque de pages qui évoluent en permanence. Une prouesse algorithmique quand on considère les échelles: aujourd'hui, le moteur de recherche Google indexe 30000 milliards de pages et, chaque jour, 20 milliards de sites sont indexés et 3,3 milliards de requêtes sont effectuées.

Comment trouver, parmi les éventuelles centaines de millions de pages qui correspondent à une requête, les quelques pages qui contiennent l'information pertinente pour le lecteur? C'est la seconde grande fonction du moteur de recherche, le classement, qui fait émerger les pages «intéressantes». Dans le cas du moteur de Google Search, le principe utilisé historiquement pour le classement est celui de la «popularité sur le graphe du Web», c'est-à-dire la probabilité pour un flâneur qui se baladerait au hasard sur la Toile de se trouver sur une page particulière. L'algorithme PageRank permet de calculer cette popularité. Aujourd'hui, de nombreuses autres informations sont utilisées pour le classement, notamment les clics des internautes, qui votent ainsi avec leurs doigts. Le moteur de recherche sait ainsi faire surgir, de la masse du Web et des choix des internautes, une intelligence collective pour évaluer, classer, filtrer les informations.

Dans les années 2000, le développement de nouvelles techniques, désignées sous le terme de Web 2.0, a permis à tout un chacun non seulement d'accéder à des informations publiées par des autorités – administrations, universités, entreprises... – mais aussi de publier lui-même des informations. Ce mouvement a conduit quelques années plus tard à des réseaux sociaux entre humains.

Au fil des ans, il est devenu évident qu'au-delà d'une collection universelle de documents, le Web offrait une gamme infinie d'applications à inventer. Nous avons vu arriver le Web de la 3D avec ses mondes virtuels, le Web des objets. Peut-être l'évolution la plus fondamentale sera-t-elle le passage d'un Web des humains à un Web où humains et machines coexistent, en s'appuyant sur les services web, les données semi-structurées, et les connaissances. À chaque fois, l'existence d'un langage standardisé est un composant essentiel du progrès.

Si le Web a été conçu initialement comme outil pour la recherche, il est devenu quasiment impossible aujourd'hui de vivre sans: de trouver du travail, de travailler, de se loger, de gérer ses comptes bancaires, presque d'avoir des amis, etc. On peut cependant regretter le Web des débuts, libre, gratuit, universel, ouvert et anarchique. Le Web évolue vers des espaces plus fermés, notamment sous la pression de la monétisation des contenus ou des biais des systèmes de recommandation, vers des espaces plus hostiles avec ses rumeurs et fausses nouvelles, ses sites racistes ou criminels... Aujourd'hui, plus que jamais, le Web est une utopie à défendre: c'est à nous de décider ce que sera le Web demain. ■

## BIBLIOGRAPHIE

S. Abiteboul et G. Dowek,  
**Le Temps des algorithmes**,  
Le Pommier, 2017.

J. Gillies et R. Cailliau,  
**How the Web was born :**  
**The story of the World**  
**Wide Web**, Oxford  
University Press, 2000.

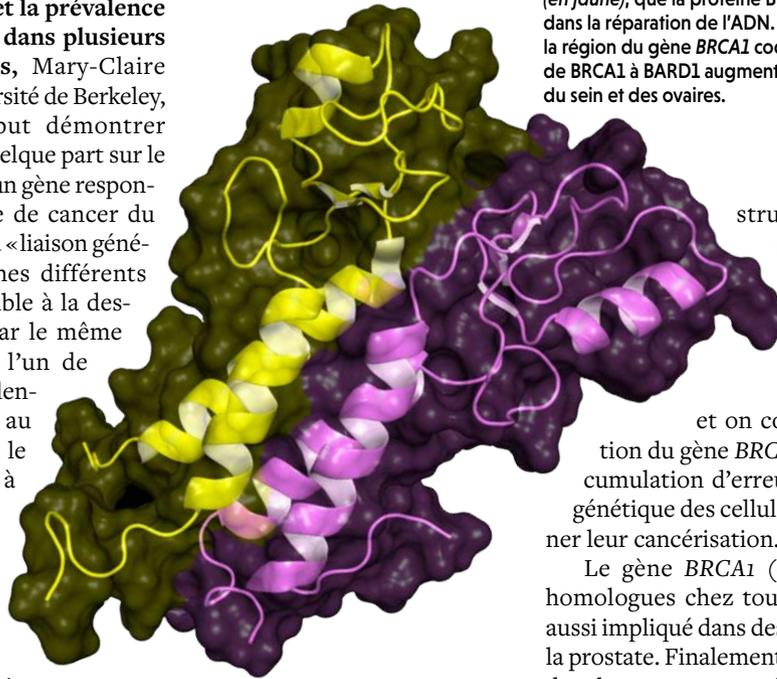
# LE GÈNE *BRCA1*, IMPLIQUÉ DANS LE CANCER DU SEIN

**E**n cherchant des corrélations entre 183 gènes connus et la prévalence du cancer du sein dans plusieurs lignées familiales, Mary-Claire King, alors à l'université de Berkeley, aux États-Unis, put démontrer en 1990 qu'il devait y avoir, quelque part sur le bras long du chromosome 17, un gène responsable d'un risque héréditaire de cancer du sein. L'analyse se fondait sur la «liaison génétique»: le fait que deux gènes différents peuvent être transmis ensemble à la descendance s'ils sont portés par le même chromosome et assez près l'un de l'autre. Cette découverte déclencha une véritable course au séquençage, à une époque où le Projet génome humain venait à peine d'être lancé (voir page 20).

Les années suivantes, de nombreux travaux, notamment à Cambridge, en Angleterre, précisèrent la position probable du gène, désormais appelé *BRCA1* (pour *breast cancer*). Finalement, en 1994, Mark Skolnick, fondateur de la start-up Myriad Genetics en 1991, conjointement avec des chercheurs de l'université de l'Utah, des Instituts américains de santé et de l'université McGill, à Montréal, identifia et séquença le gène *BRCA1*.

Le dépôt d'un brevet sur *BRCA1* par Myriad Genetics a provoqué à l'époque un scandale qui a quelque peu occulté la portée scientifique du résultat. De nombreuses objections ont été soulevées, comme le fait que le brevet plaçait Myriad Genetics dans une situation de monopole qui empêchait les patients de demander un second avis en cas de dépistage positif, ou encore que la découverte dans la nature d'un gène ne pouvait pas donner plus de droits que, par exemple, la découverte d'une espèce animale. Dans les faits, les brevets sur *BRCA1* (ainsi que ceux déposés un an plus tard sur le gène apparenté *BRCA2*) se sont révélés difficiles à faire valoir en dehors des États-Unis.

Dans sa version normale, le gène *BRCA1* code une protéine (notée *BRCA1*) comportant une structure appelée «doigt de zinc» (où un ion zinc sert en quelque sorte «d'épingle» pour plier correctement la protéine). Ce type de



C'est notamment associée à une protéine, *BARD1* (en jaune), que la protéine *BRCA1* (en rose) intervient dans la réparation de l'ADN. Plusieurs mutations dans la région du gène *BRCA1* codant le domaine de liaison de *BRCA1* à *BARD1* augmentent le risque de cancer du sein et des ovaires.

structure est connu pour être capable de se lier à l'ADN. On sait désormais que la protéine *BRCA1* est un des outils du kit de réparation du génome et on comprend qu'une mutation du gène *BRCA1* puisse favoriser l'accumulation d'erreurs dans le programme génétique des cellules concernées et entraîner leur cancérisation.

Le gène *BRCA1* (dont on a trouvé des homologues chez tous les mammifères) est aussi impliqué dans des cancers ovariens ou de la prostate. Finalement, il apparaît que lorsque de tels cancers apparaissent chez des patients pourtant dotés d'une forme fonctionnelle de *BRCA1*, c'est parfois que d'autres facteurs empêchent son expression normale. Autrement dit, la découverte du gène *BRCA1* ne concerne pas seulement les quelque 5 à 10% de cancers du sein héréditaires.

Avant ces travaux, on pensait qu'en dehors de quelques maladies dont la transmission est évidemment mendélienne (comme la drépanocytose ou anémie falciforme, une maladie héréditaire touchant l'hémoglobine – la protéine qui transporte l'oxygène dans le sang –, due à une mutation sur les deux copies héritées du gène qui code la protéine), il était vain de chercher une origine génétique pour des pathologies vraisemblablement causées par un enchevêtrement de facteurs génétiques et environnementaux. Désormais, l'oncogénétique, l'étude des mécanismes du cancer à l'échelle moléculaire et génétique, permet non seulement des dépistages, mais aussi de comprendre les mécanismes moléculaires à l'œuvre dans certains cancers. ■

R. C.

Y. Miki *et al.*, A strong candidate for the breast and ovarian cancer susceptibility gene *BRCA1*, *Science*, vol. 266, pp. 66-71, 1994

# LES TRÉSORS DE LA GROTTTE CHAUVET



**L**e 18 décembre 1994, Jean-Marie Chauvet, chargé de la surveillance des grottes ornées de l'Ardèche par le ministère de la Culture, Éliette Brunel et Christian Hillaire, spéléologues amateurs chevronnés, entrent dans une grotte du lieu-dit Pont-d'Arc. Ils comprennent immédiatement qu'ils ont fait une découverte majeure. Dans les mois qui suivent, les premières datations au carbone 14 provoquent la surprise: elles suggèrent que la grotte a été occupée à l'Aurignacien (de 36 000 à 29 000 ans), bien avant les sites rupestres les plus connus.

Certes, il apparaît dès le début que les motivations des artistes de la grotte Chauvet – quelles qu'elles aient été – les ont conduits à des choix originaux qu'on ne retrouve pas ailleurs. Outre les chevaux, bouquetins, aurochs et autres cervidés qui dominent souvent l'art rupestre, on trouve ici un nombre inhabituel d'animaux dangereux et de grands prédateurs: mammouths, rhinocéros laineux, loups, ours, hyènes et, pour la première fois, de grands félins. Les représentations d'oiseaux, notamment un spectaculaire hibou moyen-duc clairement identifiable, surprennent aussi. Mais tout de même... Qu'il s'agisse de la figuration du mouvement, de l'utilisation de l'estompe, ou de la recherche de la perspective, tout démontre que les artistes de Vallon-Pont-d'Arc se posent des problèmes esthétiques et conçoivent des solutions techniques avec la même maîtrise que ceux de Lascaux et d'Altamira au Magdalénien. Or, si les datations sont justes, près de 20 000 ans les

La grotte Chauvet est d'une importance telle qu'elle a été reconstituée à taille réelle afin que tout le monde puisse la visiter sans altérer les peintures d'origine (ici la reconstitution du panneau des rhinocéros et du grand panneau des lions, dans la salle du fond).

séparent. Lascaux serait alors chronologiquement plus proche de notre époque que de l'occupation de la grotte Chauvet!

Les recherches ultérieures ont montré que la grotte Chauvet a été occupée à deux reprises: il y a environ 36 000 ans par la culture aurignacienne, puis à nouveau il y a 25 000 ans par la culture qui lui a succédé en Europe, la culture gravettienne. Finalement, la démonstration que l'entrée de la grotte a été définitivement obstruée par un éboulement il y a 22 000 ans a fini de convaincre les plus sceptiques que les œuvres ne pouvaient pas être attribuées aux cultures solutréennes ou magdaléniennes, plus récentes.

Comparé à ce que l'on sait de l'outillage de ces cultures, cela étonne. Par exemple, les Aurignaciens ne semblent pas avoir connu le propulseur à crochet – instrument rigide qui permet d'accroître l'allonge du lancer et donc la vitesse atteinte par une sagaie. Leurs successeurs gravettiens non plus, du moins si l'on s'en tient aux preuves matérielles directes que l'on ne trouve que plus tard, dans les cultures solutréenne, puis magdalénienne. De même, l'arc ne semble pas d'usage courant avant le Magdalénien. Cet état des lieux correspond à l'image classique d'un lent progrès cumulatif des connaissances et des techniques au cours du Paléolithique supérieur. La grotte Chauvet démontre qu'au moins en ce qui concerne l'art, cette vision linéaire doit être entièrement revue. ■

**R. C.**

J. Clottes et al., *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 320(11), p. 1133-1140, 1995

## CÉDRIC VILLANI

est mathématicien et professeur à l'université Claude-Bernard-Lyon-1. Une médaille Fields lui a été décernée en 2010. Directeur de l'institut Henri-Poincaré, à Paris, de 2009 à 2017, il a été élu député de l'Essonne sur la liste de La République en marche en juin dernier.

1995



# Il y a un roman derrière le grand théorème de Fermat

Au XVII<sup>e</sup> siècle, Pierre de Fermat énonça que quel que soit l'entier  $n$  supérieur à 2, il n'existe pas d'entiers positifs  $a$ ,  $b$  et  $c$  tels que  $a^n + b^n = c^n$ . Il a fallu attendre 1995 et le mathématicien britannique Andrew Wiles pour que ce célèbre théorème soit enfin démontré. Une saga que nous commente Cédric Villani.

## **Pourquoi l'énoncé de Fermat, qui est simple et anodin en apparence, a-t-il acquis une telle célébrité ?**

Il y a tout d'abord le contraste entre le côté élémentaire de cet énoncé et la difficulté extrême de sa preuve que moi-même, par exemple, serais incapable de comprendre en détail sans avoir fait trois ou quatre années d'études préalables. L'énoncé de Fermat a attiré une multitude de mathématiciens amateurs, qui rêvaient de pouvoir entrer dans l'histoire en trouvant, un peu sur un coup de chance, une preuve. C'est encore le cas aujourd'hui, avec des gens qui sont persuadés qu'il existe une démonstration beaucoup plus simple que celle d'Andrew Wiles. Et au fil des siècles, plusieurs mathématiciens éminents ont, au détour de leurs travaux, prouvé le théorème de Fermat pour des valeurs particulières de l'exposant  $n$ . Un autre élément d'attrait est l'anecdote historique avec, en particulier, l'erreur ou le bluff de Fermat qui, dans la marge d'un livre, a écrit avoir découvert une démonstration merveilleuse, mais trop longue pour figurer dans cette marge. Il y a un roman derrière le grand théorème de Fermat, et il est haut en couleur !

## **Le « grand théorème de Fermat » est-il important pour la théorie des nombres ?**

En soi, non. Ce théorème a ici et là quelques conséquences, mais les méthodes développées pour le démontrer sont de loin plus importantes que le résultat lui-même. Et c'est une histoire qui a été pleine de rebondissements au cours des dernières décennies. Dans les années 1980, Andrew Wiles, qui était fasciné depuis son enfance par la conjecture de Fermat, a compris que certains développements dans le domaine où il faisait ses recherches (la géométrie algébrique) lui permettraient peut-être d'élaborer une démonstration. Il a alors travaillé en secret durant des années, avant d'annoncer lors d'un séminaire en 1993 y être parvenu. Mais sa preuve comportait une erreur, et il a fallu l'aide de son ancien étudiant Richard Taylor pour la réviser et l'achever, dans une course de vitesse pour ne pas se faire doubler par quelqu'un d'autre. Les méthodes mobilisées pour ce théorème continuent d'ailleurs de bouger, afin de réécrire la preuve et mieux relier l'énoncé de Fermat à d'autres sujets. Tout cela touche des domaines parmi les plus prestigieux des mathématiques, ceux qui font le plus rêver – la théorie des nombres, la géométrie algébrique, champs où l'activité est intense et où l'école française a d'ailleurs une forte expertise.

## **Pouvez-vous donner une idée de la démarche suivie par Andrew Wiles ?**

Depuis 1986, on savait, à la suite de divers travaux, que la conjecture de Fermat pouvait être vue comme un cas particulier d'un énoncé plus

vaste et plus technique, la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil. Cette « conjecture STW » datant des années 1960 prédisait une sorte de dictionnaire, de correspondance, entre les « courbes elliptiques » – des courbes (qui ne sont pas des ellipses...) définies par des équations algébriques du troisième degré à coefficients entiers, et dont on ne considère que les points à coordonnées rationnelles – et des fonctions particulières, les « fonctions modulaires ». Or on peut associer une certaine courbe elliptique à l'équation de Fermat et on a montré que si cette équation avait des solutions en nombres entiers, alors la courbe elliptique correspondante ne vérifierait pas la conjecture STW. Par conséquent, si la conjecture STW est vraie, il s'ensuit que l'équation de Fermat n'a pas de solutions en nombres entiers et le grand théorème de Fermat serait ainsi prouvé. Andrew Wiles a donc entrepris de démontrer la conjecture STW.

## **C'est ce qu'il a réussi à faire ?**

Presque. Andrew Wiles a réussi à démontrer une partie importante de la conjecture STW, qui suffisait à prouver la conjecture de Fermat. La conjecture STW complète a été démontrée plus tard, en 1999, par Christophe Breuil, Brian Conrad, Fred Diamond et Richard Taylor. Cette conjecture est d'ailleurs une brique d'un édifice plus vaste qu'on appelle le programme ou la correspondance de Langlands.

## **De quoi s'agit-il ?**

C'est un ensemble d'idées et de conjectures complexes qui ont été esquissées à la fin des années 1960 par le mathématicien canadien Robert Langlands. Ce programme établit des ponts, ou des correspondances, entre la théorie des nombres et d'autres parties des mathématiques (géométrie algébrique, théorie des groupes, etc.). Il continue à occuper aujourd'hui de nombreux chercheurs brillants, parmi lesquels Laurent Lafforgue (médaille Fields en 2002), Christophe Breuil, Ngô Bao Châu (médaille Fields en 2010)...

## **Est-il fréquent que la preuve d'un énoncé élémentaire comme celui de Fermat nécessite des mathématiques de très haut niveau ?**

Oui, j'y ai moi-même été confronté à plusieurs reprises au cours de ma carrière, dans mes travaux sur la stabilité des gaz et des plasmas. Avec mes collègues, nous nous sommes souvent retrouvés avec des preuves plutôt vertigineuses pour des énoncés qui étaient en eux-mêmes peu compliqués. Le cœur de la preuve peut être assez simple, mais c'est l'enrobage technique qui est très élaboré. Ce qu'on préfère, c'est quand l'idée centrale est à la fois simple et inattendue; mais ce n'est pas toujours le cas ! ■

**Propos recueillis par Maurice Mashaal**

## **BIBLIOGRAPHIE**

**S. Singh, Le Dernier théorème de Fermat, Fayard, 2011.**

**R. Langlands, Le programme de Langlands, Pour la Science, n° 361, pp. 122-128, novembre 2007.**

**A. Wiles, Modular elliptic curves and Fermat's Last theorem, Annals of Mathematics, vol. 141(3), pp. 443-551, 1995.**

## 1995 LA PLURALITÉ DES MONDES ENFIN CONFIRMÉE

## DÉTECTION D'EXOPLANÈTES

**B**ernard de Fontenelle écrivait déjà en 1686: «Les étoiles fixes sont autant de Soleils dont chacun éclaire un monde.» Mais comment déceler ces mondes, les exoplanètes, des millions de fois moins brillants que leur étoile mère et presque confondus avec elle sur la voûte céleste?

En 1995, à l'Observatoire de Haute-Provence, les Suisses Michel Mayor et Didier Queloz observent des oscillations dans le spectre de l'étoile 51 Pegasi dues à son déplacement le long de la ligne de visée. L'étoile tourne donc autour de son centre de gravité commun avec un autre objet. Il s'agit d'une planète comparable à Jupiter et huit fois plus proche d'elle que Mercure ne l'est du Soleil. L'année suivante, on détecte d'autres exoplanètes qui sont aussi des

# 3 513

EXOPLANÈTES ONT ÉTÉ DÉTECTÉES ET CONFIRMÉES DEPUIS 1995, SELON LA NASA.

«Jupiter chaudes», des géantes gazeuses gravitant très près de leur étoile. Leur abondance étonne – et déçoit, car de tels systèmes sont certainement dépourvus de petites planètes comparables à la Terre. Est-elle le fait d'un biais de la méthode de détection qui favorise les planètes massives et proches de leur étoile?

Cette question a stimulé l'émergence d'un nouveau pan de l'astronomie. À ces mesures dites «de vitesses radiales» s'est ajouté l'envoi dans l'espace d'instruments décelant les brèves éclipses dues au transit d'une planète devant son étoile. On connaît aujourd'hui près de 4000 exoplanètes, parmi lesquelles les petites planètes rocheuses sont en fait abondantes... Les astronomes rêvent désormais d'instruments pour capter et analyser la lumière de ces mondes à la recherche de signes de vie. ■

R. C.

M. Mayor et D. Queloz, *Nature*, vol 378(6555), pp. 355-359, 1995

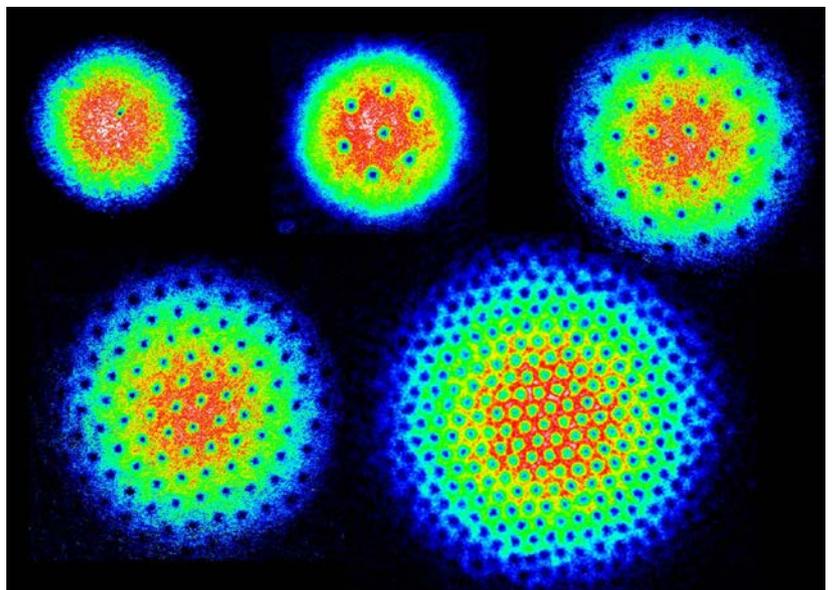
## 1995 UN NOUVEL ÉTAT DE LA MATIÈRE

## CONDENSATS DE BOSE-EINSTEIN

**E**n 1925, Albert Einstein et Satyendranath Bose prédirent que dans un gaz composé de particules indiscernables, toutes pourraient se retrouver dans un seul et même état quantique. Certes, le principe d'exclusion de Pauli, découvert la même année, interdit aux particules de matière – les «fermions», caractérisés par un spin (moment magnétique intrinsèque) demi-entier – d'être dans un même état. C'est ce qui confère à la matière sa... «fermeté»! Mais cela fonctionne pour les photons, qui sont des «bosons» – des particules de spin entier. Le phénomène est à l'origine de l'émission laser.

Il se trouve qu'un système composé de plusieurs fermions peut avoir un spin total entier et se comporter comme un boson. En 1995, Eric Cornell et Carl Wieman, au laboratoire NIST/JILA, dans le Colorado, puis Wolfgang Ketterle, au MIT, firent passer des nuages d'atomes (de rubidium ou sodium) dans une série de pièges laser puis magnétiques pour abaisser leur température au voisinage de 100 nanokelvins. Ils obtinrent des condensats de Bose-Einstein de quelque 100000 atomes ayant perdu toute individualité pour ne plus former qu'une seule fonction d'onde quantique collective.

Ces condensats exhibent à l'échelle macroscopique les comportements quantiques de la



Dans un condensat de Bose-Einstein (taches colorées ci-dessus) en rotation apparaissent des vortex – ou tourbillons – quantifiés (les points régulièrement espacés).

matière. On y a observé des franges d'interférences alternativement denses et vides typiques de la nature ondulatoire des objets quantiques, ou encore le fait que le moment cinétique est quantifié: des nombres entiers de vortex discrets apparaissent dans les condensats que l'on met en rotation. Ils sont désormais un outil précieux pour la recherche fondamentale. ■

R. C.

M. H. Anderson *et al.*, *Science*, vol. 269(5221), pp. 198-201, 1995; K. B. Davis *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75(22), pp. 3969-3973, 1995

Palais  
DÉCOUVERTE

# les conférences

Au Palais de la découverte Entrée libre dans la limite des places disponibles

Table ronde

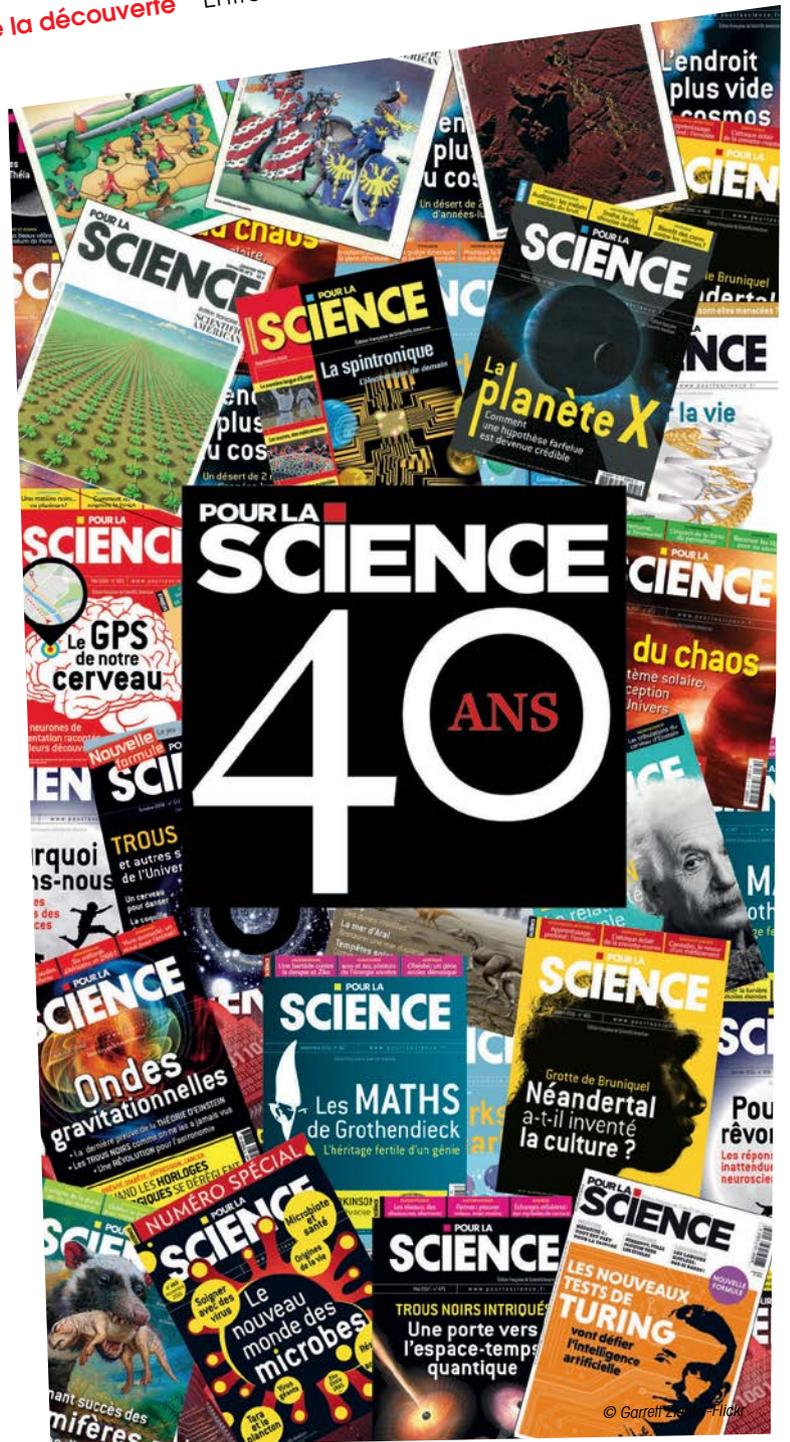
> **Mercredi 22 novembre à 19h**

## Sciences: les défis d'hier et d'aujourd'hui

Exoplanètes, imagerie du cerveau en train de fonctionner, séquençage de l'ADN, cause anthropique du changement climatique, boson de Higgs, démonstration du théorème de Fermat, web, téléphone portable... Pour son anniversaire, le magazine *Pour la science* fête 40 ans de découvertes.

Avec : Gilles Dowek, chercheur à l'Inria, professeur à l'École normale supérieure de Paris-Saclay; Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences au CEA; Valérie Masson-Delmoite, climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement au CEA; Roland Lehoucq, astrophysicien au CEA.

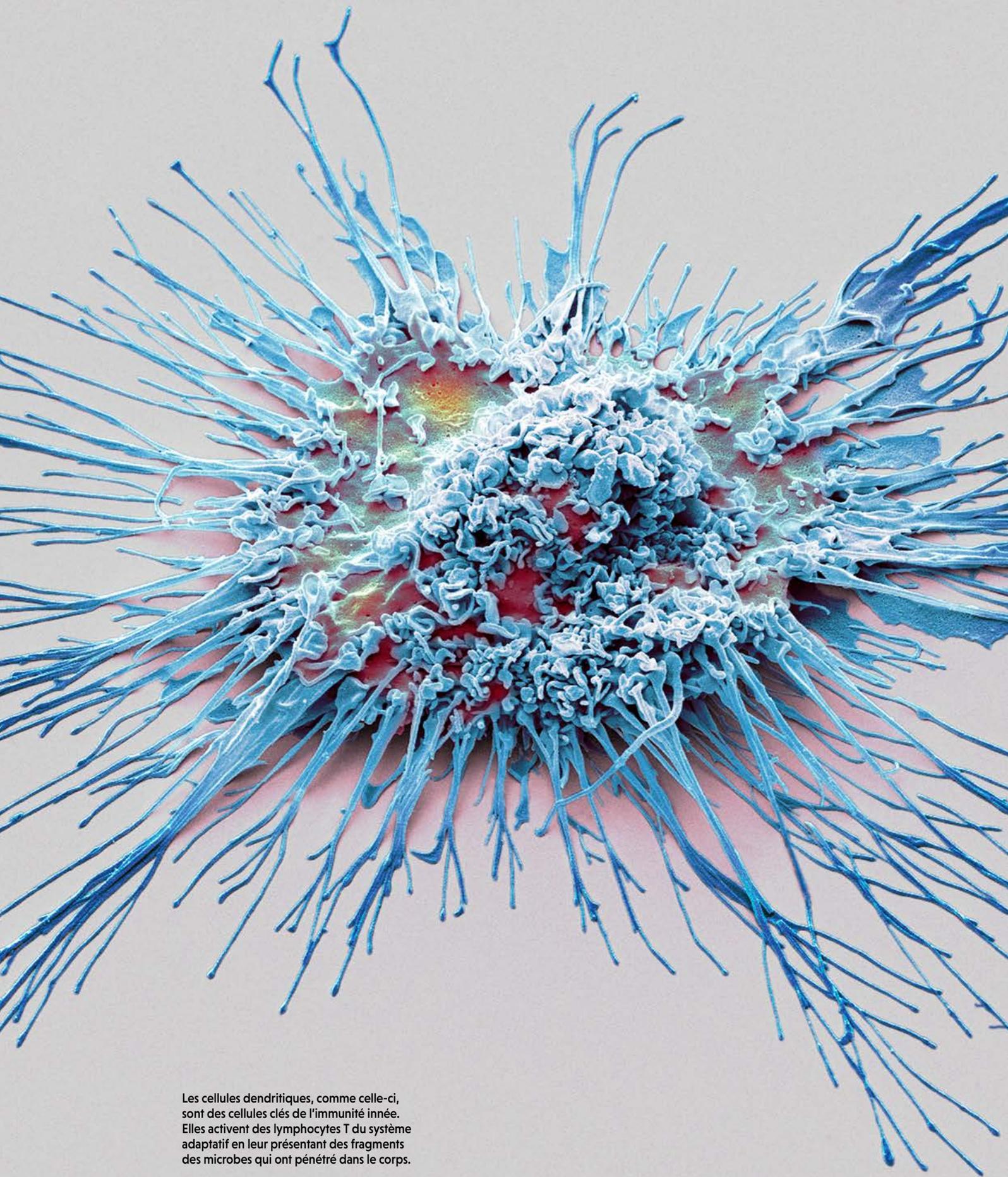
Séance animée par Cécile Lestienne, directrice de la rédaction du magazine *Pour la Science*.



En partenariat avec  
**SCIENCE**

Avec le soutien de  
**culture**

Les unes du magazine *Pour la Science* ont enregistré 40 ans de progrès de la connaissance



Les cellules dendritiques, comme celle-ci, sont des cellules clés de l'immunité innée. Elles activent des lymphocytes T du système adaptatif en leur présentant des fragments des microbes qui ont pénétré dans le corps.

1996

# Récepteur Toll

## Une nouvelle vision de l'immunité

La découverte chez la drosophile, en 1996, d'un récepteur indispensable au système immunitaire pour combattre des champignons infectieux a révélé la richesse des mécanismes immunitaires.

**D**epuis leur émergence, il y a plus d'un milliard d'années, les animaux et les plantes multicellulaires ont coévolué avec les microbes – les virus, les bactéries et les parasites. Ainsi, au fil des générations, se sont inventées d'incessantes modalités d'attaques, de défenses et de contre-attaques, mais aussi de nombreuses formes de coexistence ou de coopération mutuellement bénéfiques – des symbioses.

Le rythme d'apparition et de propagation de la nouveauté génétique héréditaire bat au rythme des générations. Et, au cours de l'évolution, le rythme des générations chez les animaux et les plantes est devenu de plus en plus lent par rapport à celui des microbes. Par exemple, pour une bactérie qui se reproduit toutes les 30 minutes, la durée d'une génération humaine, 25 ans, correspond à 450 000 générations.

Mais dans ce surgissement incessant de nouveauté, le passé exerce des contraintes: certains constituants ancestraux des microbes peuvent difficilement changer parce qu'ils sont devenus essentiels à leur survie et à leur reproduction. Et deux grandes modalités de coexistence avec les microbes ont émergé: d'abord, chez tous les animaux et toutes les plantes, un système immunitaire inné ancestral capable de répondre à ce qui, dans les grandes familles de microbes, se modifie le moins; puis, il y a environ 400 millions d'années, chez un ancêtre commun aux animaux vertébrés à mâchoire, un système immunitaire acquis, adaptatif et à mémoire, qui a la capacité de répondre à chacune des nouveautés surgissant en permanence chez les microbes. Très schématiquement: avant la naissance, certaines cellules du système adaptatif, les lymphocytes T et B, réarrangent, au >

### L'AUTEUR



**JEAN CLAUDE AMEISEN**  
médecin chercheur et immunologiste, directeur du Centre d'études du vivant, à l'Institut des humanités de Paris, au sein de l'université Paris-Diderot

> hasard, certains de leurs gènes, faisant apparaître à la surface de chaque lymphocyte un récepteur différent, capable d'interagir avec une molécule différente. Les lymphocytes qui répondent fortement à des constituants du corps – le soi – s'autodétruisent. Demeurent les dizaines de milliards de lymphocytes qui sont capables, chacun, de répondre fortement à au moins une molécule qui n'était pas présente dans le corps – permettant ainsi à l'animal d'être capable de réagir à l'imprévisible –, à l'immense univers changeant du non-soi.

Nous avons hérité de ces deux systèmes immunitaires, devenus interdépendants. Les cellules du système inné – dont les macrophages, les polynucléaires, les cellules dendritiques... – constituent notre première ligne de défense: dès que des microbes entrent dans le corps, elles les ingèrent, tentent de les détruire,

## Le système inné permet au système adaptatif de distinguer le non-soi infectieux du soi non infecté

et libèrent des molécules antimicrobiennes et pro-inflammatoires qui augmentent les défenses du corps. Certaines cellules du système inné qui patrouillent dans notre corps interagissent en permanence avec les lymphocytes T, les «chefs d'orchestre» du système adaptatif, leur présentant des fragments de ce qu'elles ont ingéré ou produit. Si l'un de ces fragments provient de l'extérieur – du non-soi –, il stimulera les lymphocytes T dont le récepteur, par hasard, est capable de répondre fortement à ce fragment. La réponse du système adaptatif est plus lente que celle du système inné, mais plus puissante et spécifiquement dirigée contre le microbe qui a pénétré dans le corps. Elle augmente les capacités de défense du système inné et induit une mémoire lymphocytaire durable: lors d'une rencontre ultérieure avec le même microbe, la réponse du système adaptatif sera beaucoup plus rapide et forte.

Une question essentielle est longtemps demeurée mystérieuse: comment le système

immunitaire détecte-t-il la pénétration de microbes dans le corps? En 1989, Charles Janeway, de l'université Yale, propose que le fonctionnement du système immunitaire ne peut dépendre uniquement, comme on le pensait alors, de sa capacité à distinguer le soi du non-soi: il doit être capable de distinguer le non-soi infectieux (les microbes) du soi non infecté, évitant ainsi d'agresser le corps en l'absence d'infection et de risquer de provoquer une maladie auto-immune ou une allergie. Le système adaptatif étant incapable d'opérer cette distinction, Janeway propose que le système inné possède des récepteurs capables de répondre à des motifs moléculaires microbiens conservés, communs à chacune des grandes familles de microbes. En 1994, Polly Matzinger, des Instituts américains de la santé à Bethesda, propose que le système inné est capable non seulement de répondre à des motifs moléculaires microbiens conservés (au non-soi infectieux), mais aussi à des composants du soi non infecté – des motifs moléculaires associés aux lésions du corps – qui sont libérés par des lésions du corps et qui traduisent l'existence d'un soi lésé ou modifié – d'un danger. La présence d'un microbe pourrait être détectée par les lésions qu'il cause, et ce sont les lésions subies ou provoquées par les cellules cancéreuses qui permettraient au système inné de les détecter et de les combattre.

### DE NOUVEAUX RÉCEPTEURS

En 1996, Bruno Lemaitre, Jules Hoffmann et leurs collègues de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire, à Strasbourg, publient la découverte, chez la drosophile, d'un récepteur – Toll – qui permet aux cellules du système inné de répondre à des infections par différents champignons. En l'absence de Toll, les mouches infectées meurent. Toll est un récepteur à un motif moléculaire associé au soi lésé ou modifié: lors d'une infection, un récepteur à un motif moléculaire microbien conservé (qui sera identifié plus tard) est activé, et découpe une protéine du corps (du soi) de la drosophile, dont un fragment active le récepteur Toll, déclenchant la réponse protectrice contre l'infection.

En 1998, Bruce Beutler et ses collègues, à l'université du Texas, à Dallas, publient la découverte, chez la souris, d'un récepteur de la même famille (qui sera nommée Toll-like), et qui répond, lui, à un motif moléculaire microbien conservé: un composant commun à la paroi de nombreuses bactéries. Puis d'autres familles de récepteurs répondant à différents motifs moléculaires microbiens conservés et/ou à différents motifs moléculaires associés aux lésions du corps seront découvertes, dont la famille des récepteurs NLR, présents à l'intérieur des cellules, et d'autres qui circulent librement dans le sang. Ainsi se révélait la richesse des mécanismes qui permettent au système inné de

détecter la présence d'un microbe et d'y répondre. Ces récepteurs lui permettent aussi de répondre aux lésions provoquées par les cancers. Mais des lésions non cancéreuses peuvent aussi induire une réponse immunitaire inappropriée au soi lésé. Et une activation excessive et persistante du système inné, que ce soit en réponse à des lésions du corps ou à des microbes, peut provoquer des maladies inflammatoires ou auto-immunes.

En 2011, le prix Nobel de médecine est décerné à Jules Hoffmann et Bruce Beutler pour leur découverte des récepteurs Toll et Toll-like. Ainsi qu'à Ralph Steinmann, de l'université Rockefeller, pour sa découverte en 1973 des cellules dendritiques – des cellules du système inné qui jouent un rôle essentiel dans l'activation du système adaptatif. Car les lymphocytes T ne répondront à un composé extérieur au corps que s'il leur est présenté par une cellule dendritique qui a elle-même répondu à des motifs moléculaires microbiens conservés. Et la cellule dendritique répondra différemment, selon que ces motifs moléculaires appartiennent à des microbes qui résident à l'intérieur ou à l'extérieur des cellules, induisant ainsi une réponse protectrice appropriée du système adaptatif. Le système inné permet donc non seulement au système adaptatif de distinguer le non-soi infectieux du soi non infecté, mais aussi d'orienter la réponse du système adaptatif en fonction du mode de vie des microbes qui envahissent le corps, et de prévenir ou d'atténuer les réponses excessives ou inappropriées du système adaptatif.

## À LA RENCONTRE DES BACTÉRIES

Notre système immunitaire inné ne répond pas seulement aux microbes qui envahissent notre corps en franchissant les barrières de notre peau ou de nos muqueuses digestive ou respiratoire. Il interagit aussi avec les microbes qui résident de l'autre côté de ces barrières, notamment avec les myriades de bactéries qui colonisent, dès notre naissance, l'intérieur de notre tube digestif, et qui constituent le microbiote. Ce dernier joue un rôle majeur dans notre digestion, notre métabolisme et la maturation de notre système immunitaire. Et notre système immunitaire inné exerce une influence, en retour, sur la composition et l'activité de notre microbiote. De ces interactions réciproques résulte une forme de symbiose dont la rupture peut provoquer des maladies inflammatoires de l'intestin, une obésité, un diabète, des maladies cardiovasculaires ou des cancers (*voir page 78*).

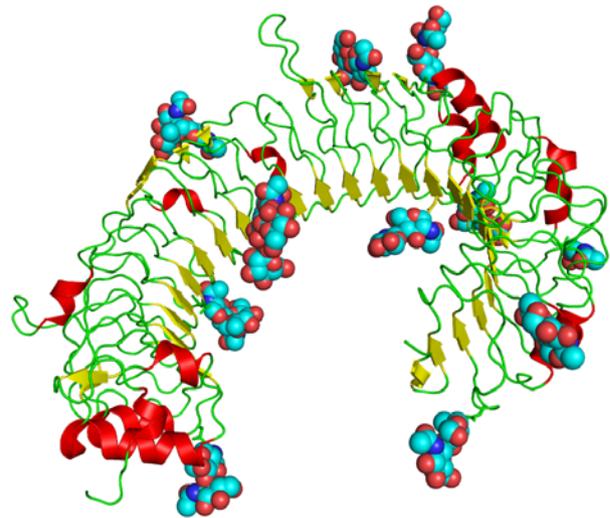
Le système immunitaire adaptatif, qui permet d'élaborer une réponse à mémoire spécifique de chaque microbe rencontré, a longtemps été considéré comme un raffinement apparu tardivement au cours de l'évolution du vivant. Mais, en 2007, il a été découvert que les bactéries aussi possèdent, en plus d'un système inné,

un système adaptatif – CRISPR-Cas – qui leur permet de se défendre notamment contre les virus qu'elles ont rencontrés. L'ADN des virus qui ont envahi la bactérie est découpé en petites portions, dont certaines demeurent stockées dans l'ADN de la bactérie : si le même virus pénètre à nouveau, cette portion est reconnue, et le virus est détruit. Et cette mémoire du système adaptatif des bactéries se transmet de génération en génération.

« La part vraiment intéressante de la recherche, disait François Jacob, c'est celle qu'on ne peut prévoir. » L'exploration des systèmes immunitaires n'a cessé d'enrichir notre vision du vivant. Elle a permis à la médecine d'élaborer des moyens radicalement nouveaux pour prévenir ou traiter des maladies : vaccins, greffes d'organes, traitements des allergies et des maladies inflammatoires, immunothérapie contre des cancers... Et c'est la découverte inattendue du système immunitaire adaptatif ancestral des bactéries – CRISPR-Cas – qui a permis l'élaboration des tout nouveaux outils moléculaires utilisés aujourd'hui pour modifier de manière extrêmement précise le génome de tout être vivant. ■

## TOLL & CO

**A**ncrés dans les membranes de cellules du système immunitaire inné, les récepteurs dits de type Toll fixent, par l'intermédiaire de leur domaine extracellulaire (ici celui du récepteur TLR-3 humain), des motifs moléculaires communs à de nombreux microbes.



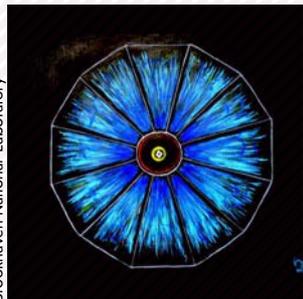
## BIBLIOGRAPHIE

A. Poltorak *et al.*, **Defective LPS signaling in C3H/HeJ and C57BL/10ScCr mice : mutations in *Tlr4* gene**, *Science*, vol. 282, pp. 2085-2088, 1998.

B. Lemaitre *et al.*, **The dorsoventral regulatory gene cassette *spätzle/Toll/cactus* controls the potent antifungal response in drosophila adults**, *Cell*, vol. 86, pp. 973-983, 1996.

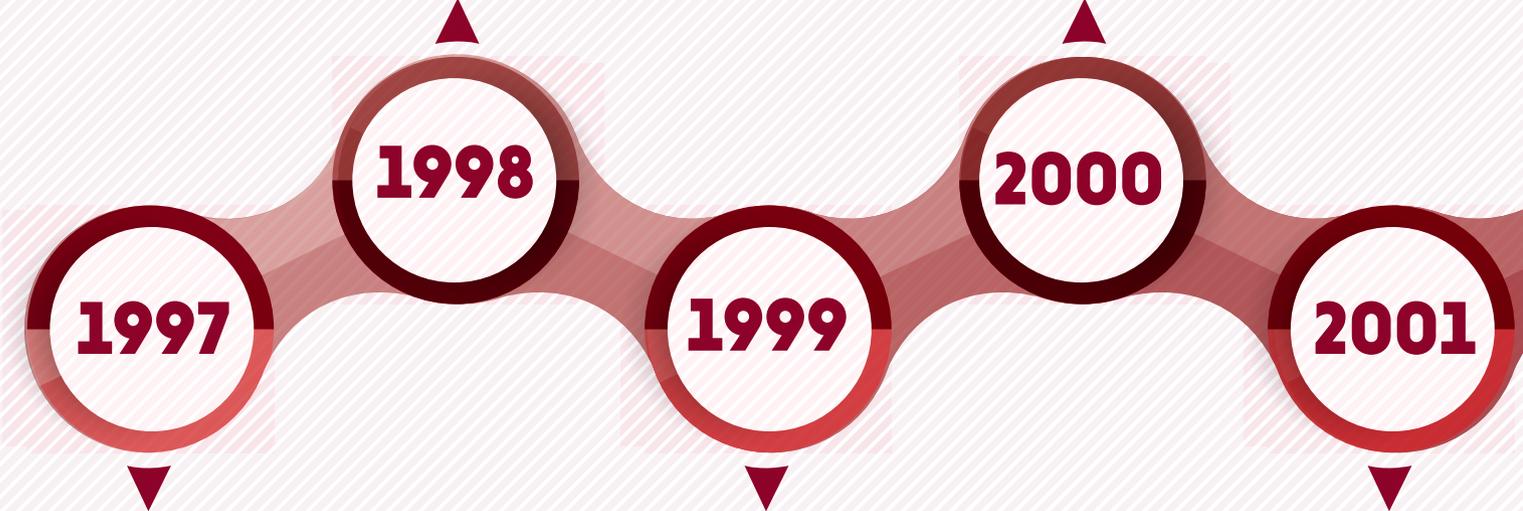
# 1997

- Découverte de l'**interférence à ARN** [p. 62](#)
- On observe une **neurogenèse** chez l'humain adulte [p. 64](#)
- Preuve de la **conjecture de Kepler** sur les empilements de sphères [p. 68](#)
- Mise en évidence de l'**oscillation des neutrinos** [p. 68](#)
- Des observations montrent que l'**expansion de l'Univers s'accélère**
- Première **opération à cœur ouvert** assistée par robotique
- Preuve expérimentale de l'impact de l'**acidification des océans** sur les coraux



Brookhaven National Laboratory

- Création d'un **plasma quarks-gluons** au Cern
- **Canope et Héraklion-Thônis**, deux cités de l'Égypte ancienne, sont identifiées sous l'eau dans la baie d'Aboukir
- Le **système GPS** est utilisable par le grand public



- Des physiciens conjecturent la **correspondance AdS/CFT**, qui relie certaines théories quantiques des champs à des théories de gravité quantique
- IBM commercialise un disque dur fondé sur l'**effet de magnétorésistance géante**



Eric Gaba / Wikimedia Commons, user: sting

- Essor des **modèles multiagents** en sciences sociales [p. 69](#)
- Sony commercialise **Aibo**, un chien robot de compagnie

- Publication d'une version partielle du **génom humain**
- Fondation de **Wikipedia**



© kenob / Shutterstock.com

# 2006



- Preuve de la **conjecture de Poincaré** p.74
- Observation de quatre nouveaux **satellites de Neptune**
- Découverte de **Toumaï** p.70



- Obtention du **graphène** p.76
- Confirmation de la présence d'**eau sur Mars** dans le passé

© NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona

- Le lien entre **microbiote intestinal et obésité** est mis en évidence chez l'humain p.78
- Début de l'**optogénétique**
- Un **mini-foie** est obtenu à partir de cellules souches humaines
- Première utilisation de la **microscopie à l'échelle de la molécule unique**
- Percée des méthodes d'**apprentissage profond** en intelligence artificielle p.100

2002

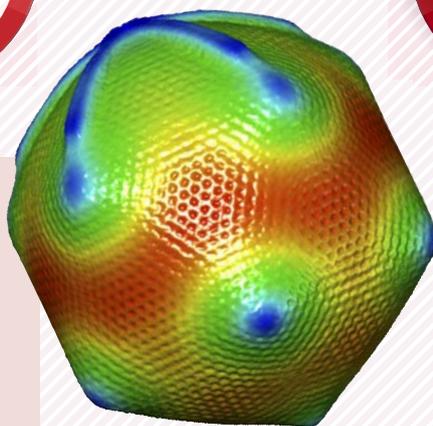
2003

2004

2005

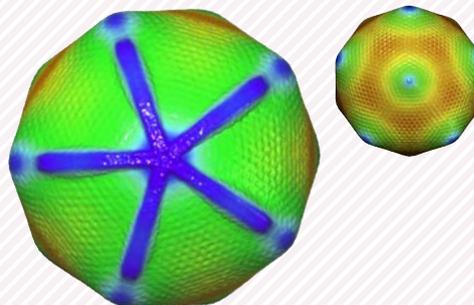
2006

- Description d'un **virus géant**, nommé Mimivirus p.76
- On met au jour dans une île indonésienne des fossiles d'un petit hominidé, **Homo floresiensis**
- Premier séquençage d'un **génomme humain complet**
- La cartographie détaillée du rayonnement du fond diffus cosmologique révèle que **l'Univers est âgé de 13,7 milliards d'années**
- Observation de la **planète naine Sedna**, l'un des objets les plus lointains du Système solaire



C. Xiao et al., Plos Biol., 2009

- Première **greffe partielle du visage**
- Des neurones clés du système de localisation du cerveau, **les cellules de grille**, sont identifiés



# L'interférence à ARN

1998

## Du nématode au médicament

L'ARN est bien plus qu'un intermédiaire de production des protéines. En 1998, un petit ver a révélé un monde à ARN d'une extraordinaire diversité dont l'exploration n'est sans doute pas terminée...

**I**l y a près de vingt ans, l'étude d'un petit ver d'environ un millimètre comptant seulement 959 cellules a mis en évidence un nouveau rôle de l'ARN: certaines molécules d'ARN dites double brin – constituées de deux brins complémentaires, comme l'ADN – interviennent dans la mise en silence des gènes. Au cours de ces travaux fondateurs, publiés en 1998 et récompensés en 2006 d'un prix Nobel, les biologistes américains Craig Mello et Andrew Fire ont injecté dans le ver nématode *Caenorhabditis elegans* de longues molécules d'ARN simple ou double brin d'environ 700 nucléotides, dont la séquence était identique à celle d'un gène du ver nommé *Unc-22*. Et là, surprise! Les ARN double brin provoquaient des contractions musculaires chez les vers, anomalies qui avaient déjà été décrites lorsque la fonction du gène *Unc-22* était inhibée. En revanche, les ARN simple brin ne produisaient pas d'effet physiologique détectable. Seuls les ARN double brin apparaissaient donc capables d'inactiver la fonction du gène.

L'expérience a été reproduite sur d'autres gènes. À chaque fois, l'effet était spécifique du

gène ciblé et s'accompagnait de la disparition de l'ARN messager (l'intermédiaire de fabrication des protéines) correspondant. Fait étonnant, non seulement de faibles quantités d'ARN double brin suffisaient pour inhiber les gènes, mais les ARN double brin semblaient passer d'un tissu à l'autre: l'expression du gène ciblé s'éteignait parfois dans un tissu qui n'avait jamais été en contact avec les ARN double brin. Ce phénomène déconcertant a été nommé interférence à ARN. Il n'était pas sans rappeler des observations décrites auparavant chez les plantes où l'introduction d'un gène surnuméraire provoquait fréquemment son extinction (et non la production de la protéine qu'il codait), mais aussi, plus surprenant encore, celle du gène endogène...

### DES ARN EXTINCTEURS

Des travaux ultérieurs, notamment chez la plante *Arabidopsis thaliana* et la drosophile, ont permis de lever le voile et de disséquer les mécanismes moléculaires sous-jacents. Les ARN double brin injectés dans les vers ou ceux provenant de l'expression aberrante du gène surnuméraire chez les plantes sont reconnus par une

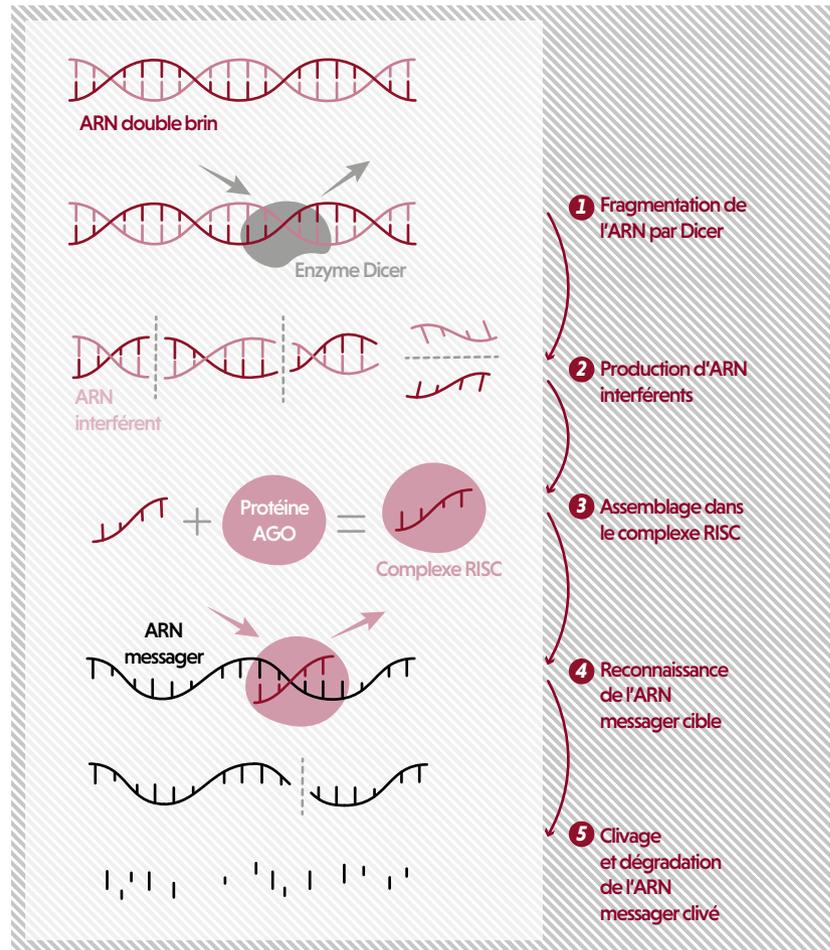
### L'AUTEUR



**JÉRÔME CAVALLÉ**  
directeur de  
recherche au CNRS,  
dans le Laboratoire  
de biologie  
moléculaire  
des eucaryotes,  
à l'université  
Toulouse III-  
Paul-Sabatier

enzyme nommée Dicer qui les découpe en courts fragments appelés ARN interférents. Par la suite, les deux brins se séparent et s'associent à des protéines pour cliver l'ARN messager cible (voir la figure ci-contre). Chez certains organismes tels *C. elegans* ou *A. thaliana*, des enzymes amplifient aussi les ARN double brin, ce qui renforce l'efficacité de l'extinction généralisée du gène cible.

Aujourd'hui, on sait que les cellules produisent, sans l'aide du chercheur, une multitude de petits ARN apparentés aux ARN interférents : ils résultent tous de la fragmentation de longues molécules d'ARN et guident, *via* le jeu des appariements complémentaires, le recrutement de protéines sur d'autres ARN, voire sur l'ADN. Par exemple, on a observé chez divers organismes que lors d'une infection virale, les virus dont le génome est constitué d'ARN double brin sont dégradés par Dicer et que les ARN interférents ainsi produits protègent les cellules en dégradant les ARN messagers viraux. Cela est particulièrement important chez les plantes, où une véritable course à l'armement s'est installée entre cellule hôte et agent pathogène, comme en témoigne la capacité de certains virus à produire des protéines capables d'inhiber l'interférence à ARN. Autre exemple, dans les cellules sexuelles, de petits ARN (les piARN) dégradent les parasites génomiques (transposons) et modifient la structure de la chromatine autour de leurs gènes afin de les empêcher de « sauter » d'un endroit à un autre le long des chromosomes.



## DES MICROARN RÉGULATEURS

Ces exemples suggèrent qu'une fonction majeure de l'interférence à ARN est de limiter les effets des séquences génétiques exogènes. Des mécanismes apparentés à l'interférence à ARN sont néanmoins aussi impliqués dans la régulation de gènes endogènes. Les microARN, notamment, sont de petits fragments d'ARN capables de bloquer la traduction de nombreux ARN messagers en limitant leur reconnaissance par les ribosomes – les structures qui gèrent cette traduction. Les microARN orchestrent ainsi divers aspects de la différenciation et du maintien de l'identité cellulaire. Certains, notamment chez les plantes, déclenchent même la dégradation de l'ARN messager cible, comme des ARN interférents. Enfin, chez la levure *Schizosaccharomyces pombe*, des ARN interférents participent à la formation de régions chromosomiques – les centromères – impliquées dans la ségrégation des chromosomes lors de la division cellulaire.

Inactiver la fonction d'un gène chez les mammifères était souvent peu reproductible et très chronophage. Aujourd'hui, c'est à la portée de n'importe quel étudiant, en introduisant dans les cellules en culture un ARN interférent artificiel dirigé contre l'ARN messager du gène ciblé. L'intérêt est évident en recherche fondamentale lorsqu'il s'agit d'inférer la fonction d'un gène.

L'interférence à ARN fait aussi l'objet d'essais cliniques visant à développer une nouvelle classe de médicaments, qu'il s'agisse d'inactiver un gène favorisant la multiplication anarchique des cellules tumorales, de bloquer la réplication d'un virus ou de moduler l'expression anormale d'un gène dans certaines maladies génétiques... La route reste cependant longue tant des obstacles techniques et conceptuels persistent. Il faut bien sûr identifier l'ARN interférent le plus stable et performant *in vivo*, mais aussi limiter sa toxicité, réduire ses effets non spécifiques et améliorer son ciblage vers le tissu visé.

D'une manière générale, la découverte de l'interférence à ARN a révélé l'importance des molécules d'ARN dans la régulation de l'activité des gènes. Ce fut un réel chamboulement à une époque où les ARN étaient encore trop souvent perçus comme de simples molécules intermédiaires lors du décodage de l'information génétique par le ribosome. Aujourd'hui, il existe un énorme engouement pour identifier et disséquer le mode d'action des ARN dits non codants. On estime que le répertoire de ces ARN produits dans une cellule humaine, qu'ils soient interférents ou non, est bien plus complexe que celui des ARN messagers, ce qui laisse présager la découverte de nouvelles fonctions. Et tout cela grâce à un simple petit ver... ■

Le principe de l'interférence à ARN est le suivant : une enzyme, Dicer, reconnaît les ARN double brin et les coupe en courts fragments, les ARN interférents (1). Les deux brins de ces ARN se séparent alors (2) et s'associent à une protéine, Ago, formant un complexe, RISC (3). Au sein de RISC, le brin d'ARN interférent s'apparie avec la région de l'ARN messager cible dont il est complémentaire (4) et la protéine Ago clive celui-ci dans cette région, ce qui entraîne sa destruction (5).

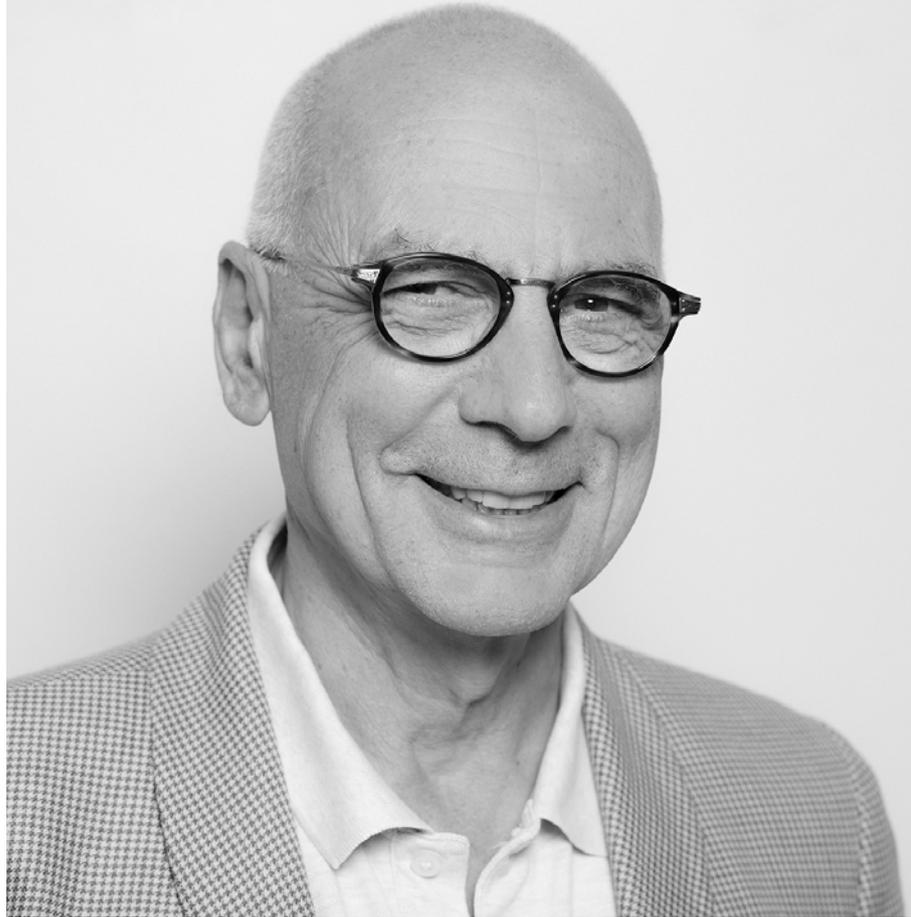
## BIBLIOGRAPHIE

A. Fire et al., **Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans***, *Nature*, vol. 391, pp. 806-811, 1998.

## ALAIN PROCHIANTZ

dirige le Centre  
interdisciplinaire de  
recherche en biologie,  
au Collège de France, à Paris,  
où il est aussi professeur,  
titulaire de la chaire Processus  
morphogénétiques.

1998



# La plasticité est l'essence du cerveau

En 1998, des neurobiologistes montrèrent que des neurones naissent continuellement dans certaines régions du cerveau humain adulte. Mais la plasticité cérébrale n'a-t-elle que des avantages ? La réponse d'Alain Prochiantz.

## Avait-on déjà, en 1998, l'intuition qu'une neurogenèse adulte existait chez l'humain ?

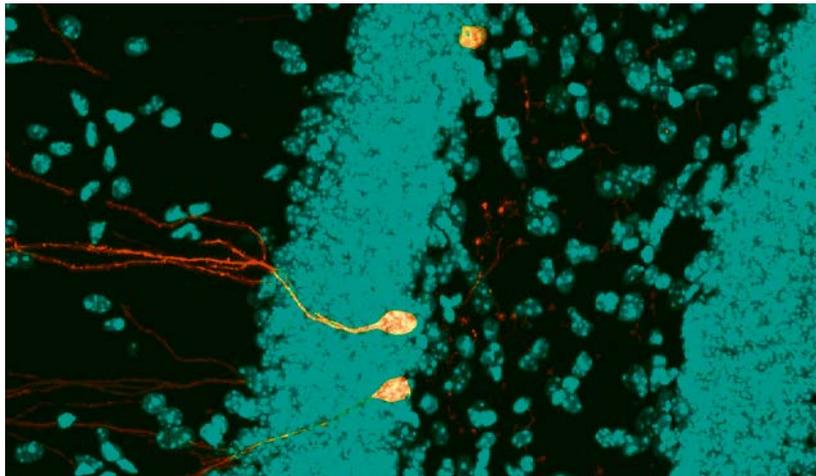
Depuis les travaux de Joseph Altman et Gopal Das, à l'institut de technologie du Massachusetts, en 1965, qui suggéraient l'existence d'une neurogenèse adulte chez le rat, l'idée avait fait son chemin, mais restait controversée. Ensuite, cette affaire est un peu tombée. Il a fallu attendre les travaux de l'équipe de Fernando Nottebohm, en 1983 à l'université Rockefeller, à New York, pour qu'elle suscite à nouveau l'intérêt. Ces chercheurs ont établi qu'au printemps, certains oiseaux chanteurs renouvellent leurs centres cérébraux du chant : chaque année, une neurogenèse adulte se produit sous l'influence de l'allongement de la durée des jours et de la montée des hormones sexuelles. Arturo Álvarez-Buylla, qui travaillait alors avec Fernando Nottebohm, montra que cette neurogenèse se produit à partir de cellules souches neurales, puis il prouva que des cellules similaires existent dans deux régions cérébrales de rongeurs.

D'une part, dans la zone dite subventriculaire, des cellules souches se divisent et donnent naissance à des neurones inhibiteurs (dits GABAergiques qui, *via* un neuromédiateur, le GABA, inhibent l'activité des neurones connectés). Ces neurones migrent et gagnent le bulbe olfactif, où ils ont un rôle physiologique dans l'olfaction. Ces cellules souches sont multipotentes : elles peuvent donner quasiment tous les types cellulaires du tissu cérébral (neurones, astrocytes, oligodendrocytes...). D'autre part, dans une petite zone – le gyrus denté – au sein de l'hippocampe, une structure impliquée dans la mémorisation, des cellules souches donnent naissance à des neurones excitateurs (glutamatergiques) qui prolifèrent et s'intègrent dans les réseaux neuronaux de l'hippocampe.

Dans les années 1990, la neurogenèse adulte était donc bien admise chez les rongeurs. Elle avait aussi été observée chez des singes. Mais pour l'homme, c'était différent. L'homme se voit toujours à part, avec son cerveau quatre fois plus gros que celui d'un singe et ses régions frontales beaucoup plus développées...

## En quoi a consisté la première preuve d'une neurogenèse chez l'humain adulte ?

En 1998, Fred Gage, à l'institut Salk pour les études biologiques, à La Jolla, en Californie, et ses collègues ont examiné des cerveaux d'humains *post mortem* qui avaient été traités contre des cancers avec du BrdU, un analogue de la thymidine, une des quatre bases constituant l'ADN. Le BrdU a une action toxique sur les cellules en division, d'où son utilisation contre les cancers, mais ici, la propriété qui intéressait Fred Gage et ses collègues était le fait que la molécule s'incorpore dans l'ADN (à la place de la thymidine) des cellules en cours de division. À l'aide de marqueurs, les neurobiologistes ont ainsi pu montrer que des



cellules marquées au BrdU étaient en cours de différenciation en neurones dans le gyrus denté, signe que de nouveaux neurones s'y formaient.

La découverte d'une neurogenèse adulte dans l'hippocampe était importante, car elle signifiait que ces neurones interviennent dans la physiologie de cette région, et donc probablement aussi dans la mémorisation, en tout cas dans la mémoire de travail (à court terme). Depuis, les travaux de René Hen, à l'université Columbia, à New York, sur des souris suggèrent que la neurogenèse adulte au sein de l'hippocampe est aussi impliquée dans le contrôle de l'humeur, en particulier de la dépression.

## Que s'est-il passé ensuite ?

Les recherches sur l'humain se sont pas mal développées, en particulier avec Jonas Frisén, à l'institut Karolinska, à Stockholm. Il n'y a aucun doute aujourd'hui sur l'existence d'une neurogenèse chez l'humain adulte dans l'hippocampe et la zone subventriculaire. En revanche, le doute subsiste sur la destination des neurones produits dans la zone subventriculaire. Pour Jonas Frisén, ils iraient non pas dans le bulbe olfactif, comme chez la souris, mais dans le striatum, une région subcorticale impliquée essentiellement dans le contrôle moteur. Mais d'autres équipes pensent que ce n'est pas le cas... Certains chercheurs soutiennent par ailleurs qu'il existe une neurogenèse dans le cortex en cas de lésion ou de pathologie, mais, là encore, l'exploration continue.

Les recherches sur les rongeurs ont quant à elles explosé, qu'il s'agisse d'étudier les mécanismes qui régissent la neurogenèse adulte ou son rôle dans l'olfaction. En particulier, Fred Gage a montré chez la souris que dans les cellules souches de l'hippocampe, des fragments du génome sont mobilisés, transcrits en ARN, puis transformés en ADN et réintégrés ailleurs dans le génome. Ce mécanisme – la rétrotransposition – existe dans de nombreuses cellules, mais il est plus ou moins réprimé. Les souris comptent environ 3000 rétrotransposons actifs, l'humain entre 80 et 100, dont une dizaine très >

En 2016, l'équipe de Fred Gage, à l'institut Salk, en Californie, a suivi chez la souris la croissance de nouveaux neurones (en rouge) dans le gyrus denté de l'hippocampe (en vert, les noyaux d'autres cellules). Que l'environnement des souris soit stimulant ou non, ces neurones commencent par lancer des branches (des dendrites) vers les neurones environnants. Ils en lançaient plus et plus vite lorsque les souris étaient stimulées, mais dans les deux cas, la majorité des dendrites se rétractait ensuite. Une explication serait que plus un neurone lance de dendrites au départ, meilleure est sa flexibilité pour sélectionner les dendrites à détruire.

> mobiles. Peu à peu, on s'est rendu compte que de la rétrotransposition avait lieu dans de nombreux tissus en prolifération, et Fred Gage l'a observée dans l'hippocampe.

Si cela se confirme, cela signifie qu'avec le temps, deux jumeaux ne seront jamais identiques: une diversité génotypique se crée dans les cellules *via* ces mutations. Sachant que lors de la neurogenèse adulte, on perd environ 90% des nouveaux neurones, on peut imaginer qu'il existe une sorte de darwinisme somatique, une sélection des cellules nerveuses en fonction du génotype créé par les mutations dues aux rétrotransposons... Une forme de plasticité du génome dans le système nerveux, en somme.

### Comment comprend-on la plasticité cérébrale aujourd'hui ?

Outre la neurogenèse adulte, il existe plusieurs «couches» de plasticité qui s'ajoutent les unes aux autres et dont les mécanismes ont été précisés ces dernières années: la plasticité à l'échelle du génome avec les rétrotransposons, celle de l'épigénome avec les modifications de l'ADN qui ne touchent pas sa séquence, mais changent son profil d'expression, celle des synapses avec les mécanismes de renforcement et de diminution des connexions en fonction des stimuli extérieurs et, enfin, celle, morphologique, des réseaux de neurones. Un des aspects les plus fascinants de la plasticité cérébrale est à mon sens illustré par les périodes critiques – des fenêtres de temps au cours desquelles les réseaux de neurones sont modifiés par l'expérience, le milieu.

### Quand ont lieu ces périodes critiques ?

Chez l'humain, elles se produisent jusqu'à l'âge de 20-30 ans – une période très longue liée au fait que notre cerveau n'est qu'à 10% de son poids à la naissance. Dans toute cette période, en particulier lorsque vous apprenez la vie sociale, puis la vie sexuelle adulte, de grandes modifications du système nerveux se produisent. C'est durant ces fenêtres de plasticité que vous apprenez plus facilement la musique, les langues étrangères ou la vision binoculaire. Leur découverte remonte aux travaux de David Hubel et Torsten Wiesel, en 1962. Ces chercheurs ont montré que la vision binoculaire d'un animal se construit à travers l'expérience, et que si vous fermez l'œil d'un chat pendant certaines périodes du développement, il n'aura jamais de vision binoculaire à l'âge adulte, même si vous rouvrez cet œil: les terminaisons nerveuses de l'autre œil ont envahi, après un relais thalamique, toutes les cibles synaptiques du cortex visuel. Chez l'enfant, si l'on n'opère pas un œil ayant une cataracte avant l'âge de 6 ans, celui-ci restera paresseux (amblyopie).

Or on commence à comprendre comment fonctionne cette plasticité. Toutes les régions du cortex ne sont pas plastiques au même

moment. C'est lié à une classe de neurones, les interneurons à parvalbumine, qui sont des inhibiteurs très actifs. Quand ils commencent à mûrir, la plasticité s'ouvre, et quand ils sont mûrs, elle s'arrête ou diminue énormément. On sait aujourd'hui rouvrir cette plasticité chez une souris amblyope adulte et lui rendre la vision binoculaire. Les implications pour l'humain sont considérables. Rouvrir cette plasticité pourrait aider à régénérer le système nerveux en cas d'accident vasculaire cérébral, voire à soigner des malades psychiatriques.

Selon une idée caressée par beaucoup de psychiatres, certaines formes de schizophrénie seraient liées à un défaut de plasticité des circuits neuronaux à l'adolescence, au moment où la maturation sexuelle arrive. Cela signifierait que l'étude des périodes critiques de la vision binoculaire chez la souris pourrait servir de modèle pour étudier cette maladie et d'autres, les mécanismes cellulaires, génétiques et moléculaires des périodes critiques étant probablement similaires.

## Il existe plusieurs couches de plasticité qui s'ajoutent les unes aux autres

### Quelles sont les autres perspectives ?

On essaye aussi d'avoir une vision intégrée de toutes les formes de plasticité. On s'aperçoit par exemple que chez la souris les marques épigénétiques changent quand on rouvre la plasticité des circuits neuronaux de la vision... L'idée d'un système nerveux pas entièrement plastique ouvre aussi des voies à une meilleure compréhension de celui-ci, voire d'*Homo sapiens*. La plasticité est l'essence du système nerveux: si vous coupez le cerveau d'un poisson, il repousse. Chez l'humain, des mécanismes se mettent en place pour bloquer cette plasticité. Cela permet de stocker ce que l'on a appris. Certes, nos capacités de réparation s'en trouvent limitées, mais le gain évolutif est formidable en termes d'individuation, d'apprentissage et de mémorisation. ■

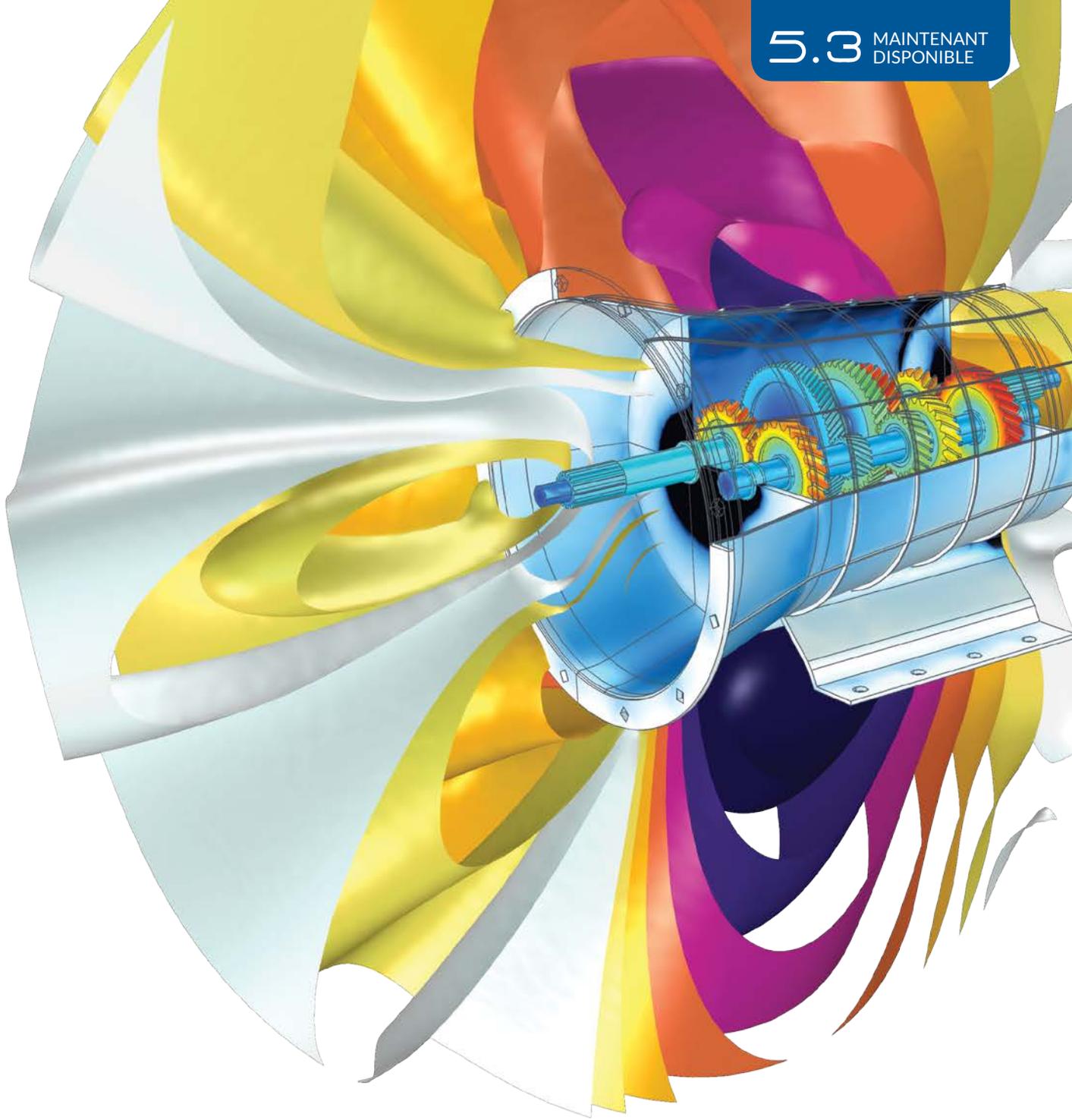
Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

### BIBLIOGRAPHIE

A. Prochiantz, **Régénération et plasticité dans le système nerveux**, Cours 2010-2011, Collège de France, [bit.ly/2y6tbLk](http://bit.ly/2y6tbLk)

G. Kempermann et F. Gage, **La multiplication des neurones chez l'adulte**, *Pour la Science*, n° 261, pp. 30-35, juillet 1999.

P. S. Eriksson et al., **Neurogenesis in the adult human hippocampus**, *Nature Medicine*, vol. 4(11), pp. 1313-1317, 1998.



# LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique  
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

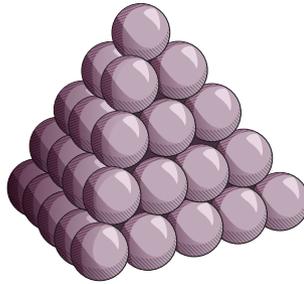
[comsol.fr/products](http://comsol.fr/products)

## 1998 MATHÉMATIQUES POUR EMPILEMENTS D'ORANGES

## LA CONJECTURE DE KEPLER ENFIN PROUVÉE

**S**ur son étal, le marchand de fruits et légumes empile les oranges selon un motif pyramidal: une boule repose au creux d'un triangle de trois boules, elles-mêmes posées sur six boules, etc. Il en est de même, par exemple, des boulets entassés derrière un canon. Il semble évident pour tout le monde que cet empilement de sphères identiques est le plus dense possible. C'est aussi ce que pensait l'astronome Johannes Kepler, qui conjectura ce résultat en 1611. Mais le démontrer s'est révélé beaucoup moins évident...

Il fallut attendre 1831 pour que Carl Friedrich Gauss prouve que la conjecture de Kepler



est vraie si l'on impose que l'empilement soit régulier. Mais il ne parvint pas à démontrer le cas général. En 1953, le mathématicien hongrois László Fejes Tóth démontra que le problème pouvait être réduit à une série colossale mais finie de calculs (environ 100 000 problèmes de programmation linéaire). En 1998, en s'inspirant de ces travaux et en effectuant les calculs par ordinateur, Thomas Hales, de l'université du Michigan, annonça la résolution du problème. La conjecture était enfin prouvée!

La démarche ressemblait à celle adoptée pour le théorème des quatre couleurs (voir page 23), mais, en lui succédant de près d'une génération, elle a été d'emblée mieux acceptée et la preuve a été considérée comme presque certainement juste. Sa reproduction en 2013 à l'aide de programmes assistants de preuve a levé toute incertitude quant à sa validité. ■

R. C.

T. C. Hales, *A proof of the Kepler conjecture*, *Annals of Mathematics*, vol. 162, pp. 1065-1185, 2005

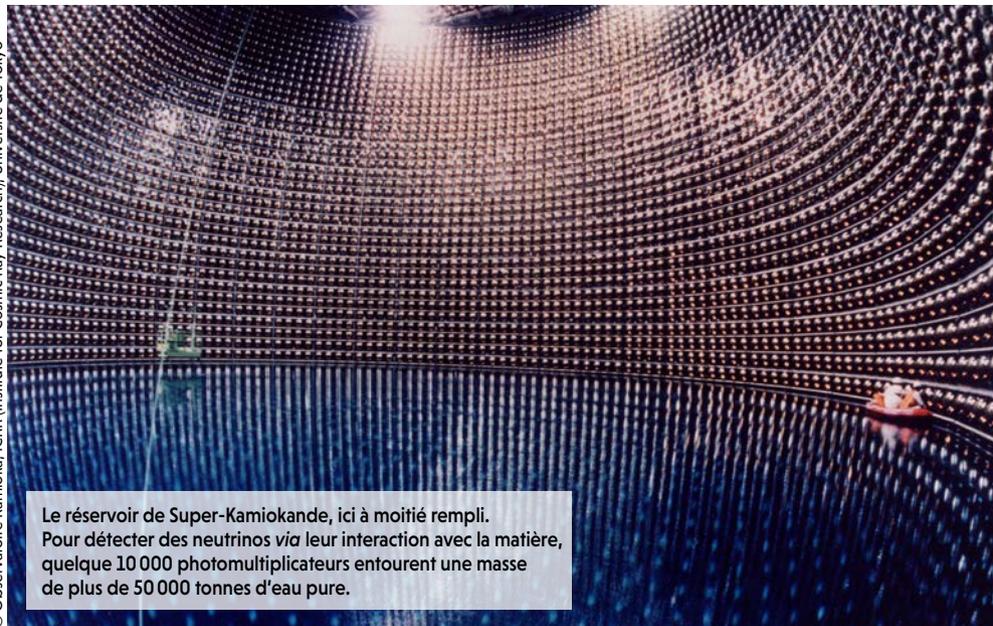
## 1998 CHANGEMENTS PÉRIODIQUES D'IDENTITÉ

## L'OSCILLATION DES NEUTRINOS

**L**e modèle standard de la physique des particules prédit qu'aux trois variétés de leptons chargés, à savoir l'électron, le muon et le tau, sont associés trois neutrinos: le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique, tous de masse nulle. Leur interaction avec la matière est si faible qu'il faut des détecteurs constitués de dizaines de milliers de tonnes d'eau, par exemple, pour espérer en capturer une poignée par jour sur des milliards par seconde. Même ainsi, les détecteurs souterrains (pour s'affranchir du bruit de fond dû aux rayons cosmiques) mis au point à la fin des années 1960 par l'Américain Raymond Davis n'enregistraient qu'entre un tiers et la moitié des neutrinos (électroniques) attendus en provenance du Soleil. Le modèle astrophysique décrivant cette étoile était-il faux?

En 1957, Bruno Pontecorvo, à l'Institut de recherche nucléaire de Dubna, en Union soviétique, montra que si les neutrinos ont des masses différentes (et donc des masses tout court), alors leurs longueurs d'onde quantiques diffèrent et se déphasent au cours de leur progression.

© Observatoire Kamioka, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), Université de Tokyo



Le réservoir de Super-Kamiokande, ici à moitié rempli. Pour détecter des neutrinos via leur interaction avec la matière, quelque 10 000 photomultiplicateurs entourent une masse de plus de 50 000 tonnes d'eau pure.

Un neutrino de type électronique émis par le Soleil verrait alors son identité «osciller» d'un type à l'autre au cours de son trajet, de même que sa probabilité d'être détecté, car la matière interagit moins avec un neutrino s'il est de type muonique ou tauique.

En 1998, après des mois de prise de données, l'expérience Super-Kamiokande, au Japon, apporta une première confirmation

des résultats de Davis et de l'hypothèse de l'oscillation des neutrinos (donc de leurs masses non nulles). Le modèle du Soleil était sauvé. Mais près de vingt ans plus tard, l'origine des masses des neutrinos et de leurs différences reste à élucider. ■

R. C.

Y. Fukuda *et al.*, *Measurements of the solar neutrino flux from Super-Kamiokande's first 300 days*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, pp. 1158-1162, 1998

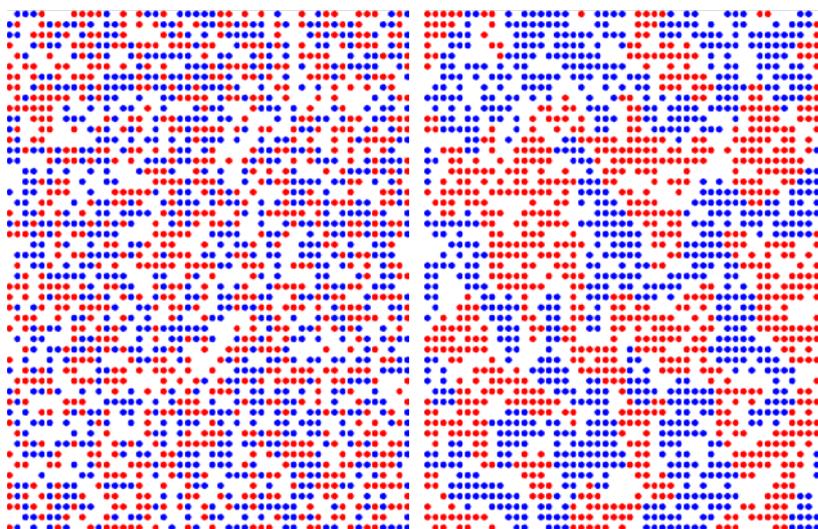
# SIMULATIONS MULTIAGENTS POUR EFFETS DE GROUPE

**U**ne fourmi ne voit qu'à quelques centimètres devant elle. Tout au plus peut-elle décider de suivre ou non une trace de phéromone laissée par une congénère assez récemment pour que la substance ne se soit pas évaporée. Pourtant, le jeu complexe des règles simples qui régissent le comportement individuel des fourmis permet à la fourmière de trouver une bonne approximation du chemin le plus court vers un pot de confiture situé à des dizaines de mètres du nid, malgré la perception très limitée des individus... et chacun a pu constater qu'elle le fait parfois très vite !

Reproduire cette performance dans une simulation informatique implique de résoudre une foule de problèmes. Il faut par exemple simuler le fait que les décisions des agents (les fourmis dans notre exemple) sont simultanées, de même que les réactions de leur environnement, alors que les machines sont essentiellement séquentielles (elles traitent leurs tâches les unes après les autres). Chaque intervalle de temps implique alors une énorme masse de calculs qu'il faut autant que possible réduire. On doit aussi s'assurer que la représentation complète de l'environnement dans la simulation ne vient pas « informer » les agents par quelque biais de la programmation, c'est-à-dire que ces derniers ne disposent effectivement que de la petite fraction d'informations à laquelle ils sont censés accéder (un problème souvent moins évident qu'il n'y paraît).

Après des décennies de progrès informatiques s'appuyant sur l'augmentation exponentielle de la puissance de calcul depuis l'époque héroïque des premiers automates cellulaires (le « jeu de la vie » proposé par le mathématicien britannique John Conway en 1970), les simulations multiagents se sont répandues dans de nombreuses disciplines.

Y compris en sciences sociales, où l'avènement de cette démarche est marqué par la publication en 1999 du manuel *Simulation for the Social Scientist* par deux sociologues, l'Anglais Nigel Gilbert et l'Allemand Klaus Troitzsch, pionniers en la matière. Il s'agit notamment de comprendre l'émergence de phénomènes collectifs (ségrégation, propagation d'une mode, etc.) à partir de comportements individuels modélisés par des règles simples – que l'on peut ajuster au fur et à



Un exemple de simulation multi-agents (modèle de Thomas Schelling) montrant un phénomène de ségrégation ethnique. L'état initial (à gauche) représente une ville à deux ethnies (en bleu et rouge) dont les habitants sont logés au hasard. Pour chaque habitant, on applique la règle : « Si moins de 50 % de mes plus proches voisins sont de la même ethnie que moi, je déménage ». Au bout de quelques itérations, on voit apparaître des quartiers homogènes (à droite).

**LES AUTOMATES  
CELLULAIRES  
SONT LES ANCÊTRES  
DES MODÈLES  
MULTIAGENTS.  
LE PREMIER A ÉTÉ  
CONÇU PAR LE  
MATHÉMATICIEN  
JOHN VON NEUMANN,  
DANS LES  
ANNÉES 1940. C'ÉTAIT  
UN RÉSEAU DE  
CELLULES DONT  
CHACUNE ADOPTE  
UN ÉTAT PARI  
29 POSSIBLES,  
EN FONCTION  
DES ÉTATS DES  
CELLULES VOISINES  
AU PAS DE TEMPS  
PRÉCÉDENT.**

mesure des simulations, de façon à identifier les facteurs les plus pertinents.

On utilise aussi les simulations multiagents en économie, en architecture (conception d'issues de secours adaptées en cas de mouvements de panique, par exemple), en urbanisme (impact de modifications des infrastructures), pour étudier le trafic routier (jusque-là simulé à l'aide d'équations inspirées de la mécanique des fluides, qui ne tiennent pas compte de la capacité des conducteurs à prendre des décisions plus ou moins heureuses). Même l'industrie du cinéma s'en sert, depuis que Peter Jackson a fait ainsi simuler les mouvements des armées multitudinaires de son *Seigneur des anneaux*...

Outre la production de simulations réalistes et prédictives, la capacité des systèmes multiagents à s'autoorganiser est exploitée directement pour explorer les arborescences du Web ou d'une base de données à la manière des fourmis, ainsi que dans la conception d'algorithmes capables de se modifier eux-mêmes pour trouver des solutions optimales à certains problèmes. Les simulations multiagents sont dès lors aussi une branche de l'intelligence artificielle. ■

R. C.

N. Gilbert et K. G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, McGraw-Hill, 1999

2002

# Toumaï confirme que nous sommes tous des Africains

Il y a 7 millions d'années, au Tchad, vivait le plus vieil hominidé connu : Toumaï. Ce bipède grimpeur de 1 mètre de haut pour 35 kilogrammes, probablement très proche du dernier ancêtre commun aux chimpanzés et aux humains, ancre nos origines en Afrique.



## L'AUTEUR



**MICHEL BRUNET**  
professeur émérite  
au Collège de France  
(chaire de  
Paléontologie  
humaine) est aussi  
professeur associé  
à l'université  
de Poitiers (IPHEP-  
UMR 7262-CNRS)

Reconstitution du crâne  
de *Sahelanthropus tchadensis*,  
dit Toumaï, par Elisabeth Daynes  
(artiste, Paris).

**E**n 2002, la Mission paléoanthropologique franco-tchadienne (MPFT) décrit Toumaï. La découverte de cet hominidé de 7 millions d'années (7 Ma) montre tout le chemin parcouru depuis l'introduction par Jean-Baptiste de Lamarck, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, de l'idée qu'une espèce peut évoluer. Après Lamarck, la notion de l'existence d'autres formes humaines que la nôtre ne s'est imposée qu'avec la mise au jour en 1856 en Allemagne du premier fossile de Néandertalien. Trois ans plus tard, en 1859, Charles Darwin publia son œuvre magistrale et visionnaire *Sur l'origine des espèces par la sélection naturelle*, une véritable théorie de l'évolution. Puis, en 1871, dans son ouvrage *L'Ascendance de l'homme*, il affirma en outre l'existence de liens de parenté entre l'homme et les grands singes africains. Constatant que les genres *Gorilla* et *Pan* (chimpanzés) sont les plus proches du genre *Homo*, il estima, en quelque mesure, plus probable que nos premiers ancêtres hominidés aient vécu sur le continent africain qu'ailleurs. Cette prédiction de Darwin sera progressivement vérifiée par la paléontologie humaine puis finalement par la biologie moléculaire.

Ainsi, en 1967, Allan Wilson et Vincent Sarich de l'université de Californie, à Berkeley, démontrèrent notre très grande proximité génétique avec les chimpanzés: ils établirent que moins de 2% de leur ADN différent du nôtre. Cette proximité traduit le fait que les hominidés (la famille humaine) partagent un ancêtre commun avec les panidés (la famille chimpanzée).

La confirmation paléontologique de la prédiction de Darwin vint bien plus lentement. Dans le cadre de la quête de notre ancêtre, les découvertes de fossiles humains se sont succédé dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle: d'abord en Europe (Néandertaliens, Cro-Magnon); puis en Asie (*Homo erectus*). En 1925, Raymond Dart décrit en Afrique du Sud l'enfant de Taung (2,5 millions d'années), le tout premier australopithèque connu (*Australopithecus africanus*). Enfin, en Afrique orientale, les nouvelles découvertes s'accumulent pour des âges compris entre 2 et 6 Ma: *Paranthropus boisei* (2,4 Ma) en 1959, *Paranthropus aethiopicus* (2,3 Ma) en 1967, puis Lucy (3,2 Ma) en 1974 et ses frères pour la nouvelle espèce *Australopithecus afarensis* en 1978.

La communauté paléoanthropologique internationale prend alors conscience que notre histoire s'enracine profondément en Afrique. La distribution géographique singulière des australopithèques (Afrique australe et orientale),

associée au fait que les plus anciens connus sont tous est-africains (3,6 Ma, Laetoli en Tanzanie), conduit Yves Coppens à proposer, en 1982, le paléoscénario East Side Story, c'est-à-dire l'idée que les préhumains bipèdes ont évolué dans une savane originelle située à l'est du Grand Rift africain. En 1982, la découverte au Pakistan d'un massif facial permet de démontrer que *Ramapithecus* (7-12 Ma), que l'on supposait à l'origine du rameau humain, est en réalité la femelle du *Sivapithecus*, genre apparenté aux pongidés, la famille de l'orang-outan. Le paléoscénario proposé par Yves Coppens se substitue alors très vite à l'hypothèse antérieure d'une origine asiatique de la famille humaine.

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, les plus anciens hominidés avérés remontent désormais au Miocène supérieur (11,6 à 5,3 Ma). Ainsi, en Éthiopie, des équipes internationales menées par Yohannes Hailé-Selassié aujourd'hui à l'université Case Western Reserve, et Tim White de l'université de Californie, à Berkeley, ont successivement découvert *Ardipithecus kadabba* (5,2-5,8 Ma) puis son successeur pliocène probable *Ardipithecus ramidus* (4,4 Ma); à Lukeino au Kenya, Brigitte Senut, du Muséum national d'histoire naturelle, a pour sa part décrit *Orrorin tugenensis* (6 Ma). Depuis 1995, la MPFT a en outre décrit au nord du Tchad *Australopithecus bahrelghazali*, dit Abel (3,5 Ma), le premier australopithèque connu à l'ouest du Grand Rift africain, puis en 2002 *Sahelanthropus tchadensis*, c'est-à-dire Toumaï et ses frères (7 Ma).

## LES HOMINOÏDES, SUPERFAMILLE

D'où sont sorties toutes ces formes? La paléontologie et la phylogénie moléculaire montrent que les hominidés appartiennent au groupe des anthropoïdes, des singes, qui évoluaient en Asie il y a plus de 50 millions d'années, puis, très tôt, sont passés en Afrique. Il existe aujourd'hui deux grands groupes frères de singes anthropoïdes: les Catarrhiniens (singes de l'Ancien Monde) et les Platyrrhiniens (singes du Nouveau Monde ou Néotropicaux). Probablement originaire directement d'Afrique, ce dernier groupe a migré il y a longtemps (vers 37-40 Ma) vers l'Amérique du Sud par une route qui demeure encore conjecturale: îles Shetlands du Sud, péninsule Antarctique...

Au sein du premier groupe, nous les humains, appartenons à la superfamille des Hominoïdes, actuellement représentés en Asie par les gibbons (*Hylobates* et *Symphalangus*) et les orangs-outans (*Pongo*), en Afrique par les gorilles (*Gorilla*) et les chimpanzés (*Pan*), et sur l'ensemble de la

> planète Terre (depuis au moins 200 000 ans en Afrique) par l'espèce *Homo sapiens sapiens*, qui fait partie du genre *Homo*, lui aussi apparu en Afrique il y a de 2,5 à 3 millions d'années.

Compte tenu de la très grande biodiversité des Hominoïdes fossiles miocènes décrits en Eurasie, certains auteurs ont pensé pouvoir envisager une origine eurasiatique de la population ancestrale commune aux gorilles, chimpanzés et humains. D'autres ont même cru devoir décrire très récemment l'existence d'un « possible préhumain » européen dans le Miocène supérieur. Une hypothèse à mon avis trop audacieuse étant donné les restes fossiles bien trop fragmentaires et connus de longue date sur lesquels elle est fondée. Les partisans de cette hypothèse argumentent en effet en se fondant sur des caractères liés à la variabilité individuelle plutôt que sur des synapomorphies robustes (caractères dérivés partagés).

Quoi qu'il en soit, dans les années 1980, les hominidés anciens provenaient tous soit de l'Afrique orientale, soit de l'Afrique australe, de sorte que la théorie de l'East Side Story dominait complètement. C'est dire l'importance des découvertes dans le désert du Djourab au Tchad de la Mission paléanthropologique franco-tchadienne: avec Abel en 1995 (3,5 Ma), l'East Side Story a d'abord été remise en cause, puis dépassée avec Toumaï en 2002 (7 Ma). Il

## Depuis 2002, la longueur de nos racines a doublé : elle est passée de 3,6 à 7 millions d'années

était désormais clair que la théorie d'une origine africaine australe ou orientale de la famille humaine (les paléanthropologues diraient du clade humain) devait être reconsidérée. L'impact scientifique de ces découvertes fut pour cette raison tout à fait comparable à celui de la découverte en Afrique du Sud de l'enfant de Taung, le premier australopithèque.

Depuis 2002, la longueur de nos racines temporelles a aussi presque doublé: elle est passée de 3,6 à 7 millions d'années, puisque trois nouvelles espèces ont été décrites dans le Miocène supérieur: *Ardipithecus kadabba* (5,2-5,8 Ma) et

*Orrorin tugenensis* (6 Ma), tandis que le plus ancien (7 Ma) est l'hominidé tchadien.

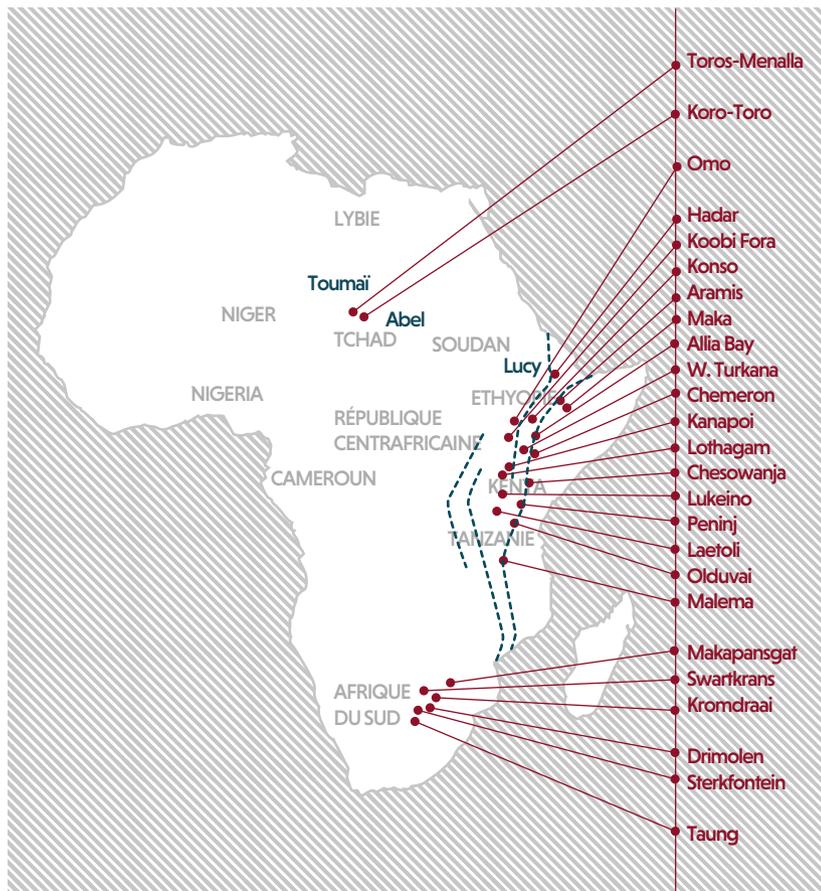
*Sahelanthropus tchadensis* possède une combinaison unique de caractères primitifs et dérivés qui montre clairement qu'il ne peut être rapproché ni des gorilles ni des chimpanzés. Ces caractères traduisent au contraire son appartenance au rameau humain et par l'âge sa proximité temporelle avec le dernier ancêtre commun aux chimpanzés et aux humains. Au Tchad, les données sédimentologiques et paléobiologiques et l'association faunique (plus d'une centaine d'espèces dans le site de Toumaï...!) témoignent de l'existence, il y a 7 millions d'années, d'un paysage mosaïque dans cette région. Le delta de l'Okavango dans le Kalahari central au Botswana nous paraît être un bon analogue actuel: il comporte un paysage mosaïque fait de rivières, de lacs, de marécages, de zones boisées, d'îlots forestiers, de savanes arborées, de prairies herbeuses et de zones désertiques. Le mode de vie de Toumaï dans ce paysage est encore en cours d'étude, mais comme les autres hominidés du Miocène supérieur, il devait avoir une préférence pour des espaces plus ou moins boisés.

En outre, si Toumaï et les autres hominidés du Miocène supérieur sont liés à des paysages mosaïques plus ou moins arborés, ils étaient probablement tous des bipèdes grimpeurs. Ainsi, le rôle hypothétique crucial attribué à la savane dans l'origine du rameau humain fait dorénavant partie de... l'histoire de notre histoire.

Par ailleurs, par les caractères anatomiques particuliers de sa denture – morphologie des canines à couronnes petites et à usure apicale (à l'extrémité), émail des dents jugales d'épaisseur intermédiaire entre celle des chimpanzés et des australopithèques – et par ceux de son crâne – basicrâne de type bipède –, Toumaï représente un nouveau grade évolutif, le troisième décrit après *Australopithecus* et *Homo*.

Les deux autres hominidés du Miocène supérieur – l'Éthiopien *Ardipithecus kadabba* et le Kényan *Orrorin tugenensis* – appartiennent sans guère de doute au même grade évolutif. Ceci a d'ailleurs été montré de manière magistrale par Tim White et son équipe pour *Ardipithecus ramidus* par sa denture – canine petite et asymétrique, émail d'épaisseur intermédiaire... –, son crâne – trou occipital en position antérieure – et sa locomotion de type bipède grimpeur – gros orteil complètement opposable, sans cambrure plantaire. Ainsi, ce « pied plat » ne pratiquait pas le *knuckle-walking* (la marche avec doigts de la main repliés permettant de s'appuyer sur le sol avec le dos des secondes phalanges des doigts, une locomotion bien connue chez les chimpanzés actuels) et fréquentait un environnement boisé.

Les fossiles mis au jour depuis 1994 nous ont donc appris que ces premiers hominidés fréquentaient des paysages mosaïques à



L'Afrique, ce berceau  
Les nombreux sites orientaux qui  
ont milité pour l'East Side Story  
et les deux sites occidentaux  
qui ont provoqué  
son renversement.

environnements boisés (ardipithèque), mais aussi des savanes arborées et des prairies herbeuses; nous savons aussi qu'ils n'étaient pas restreints à l'Afrique australe et orientale, mais vivaient dans une zone géographique beaucoup plus vaste incluant l'Afrique sahélienne (du moins l'Afrique centrale avec le Tchad), mais probablement aussi l'Algérie, l'Égypte, la Libye, le Cameroun, le Niger et le Soudan...

Il y a 4 millions d'années environ, ces hominidés anciens ont donné naissance aux australopithèques: *Australopithecus anamensis*, puis *Australopithecus afarensis* (Lucy), *Australopithecus bahrelghazali* (Abel), etc.; eux-mêmes à l'origine entre 2,5 et 3 millions d'années des premiers représentants du genre *Homo*. Ces premiers bipèdes terrestres stricts, qui seront ensuite les premiers migrants à se déployer sur le reste de l'Ancien Monde, où les plus anciens actuellement connus sont datés à 1,8 million d'années à Dmanisi en Géorgie.

Ainsi, comme c'est le cas pour tous les autres groupes de mammifères, notre évolution n'est pas linéaire, mais au contraire buissonnante. Au cours de notre histoire évolutive, plusieurs espèces d'hominidés ont souvent coexisté sur la Terre. D'ailleurs, nous ne sommes plus qu'une seule espèce seulement depuis l'extinction d'*Homo floresiensis* (dit le

Hobbit), un petit hominidé mis au jour sur l'île de Flores, en Indonésie, qui n'a probablement disparu qu'il y a quelque 50 000 ans.

Enfin il faut signaler l'extraordinaire découverte faite en 2015 par une équipe française (en collaboration avec des collègues américains) à Lomekwi 3, au Kenya: des outils taillés il y a quelque 3,3 millions d'années, donc avant les plus anciens représentants actuellement connus du genre *Homo*. Elle montre que, contrairement aux anciennes idées reçues, les membres du genre *Homo* ne furent certainement pas les seuls hominidés capables de façonner des outils... Cela est d'autant plus fascinant que les premiers foyers avérés montrent que le feu, pour sa part, ne sera maîtrisé que beaucoup plus tardivement, il y a quelque 500 000 ans.

## LES HOMMES MODERNES PEUPELNT LA TERRE

Les hommes modernes vont peupler la Terre à l'exception de l'Antarctique. Les plus anciens sont avérés en Afrique il y a 2-300 000 ans. Puis, ils peupleront successivement le Moyen Orient (avant 100 000 ans), l'Asie (vers 100 000 ans), l'Australie (vers 65 000 ans), l'Europe (vers 40 000 ans), mais n'occuperont le continent américain, par la voie de l'isthme de Béring, que très tardivement (vers 15 000 ans).

Certes, nombre de propositions pour le peuplement américain se sont succédé, mais elles ont toujours été l'objet de controverses. Ainsi, la dernière en date – la proposition d'une migration vers les Amériques il y a quelque 130 000 ans – ne pourra être retenue que lorsque davantage de matériel et de nouvelles datations seront publiés. Sur le site de Cerutti Mastodon, en Californie du Sud, nous disposons en effet de ce qui ressemble à des artefacts qui pourraient avoir servi à casser les os d'un mastodonte (cinq d'entre eux présentent des traces d'impact et d'usure sûrement liées à leur utilisation), ce qui est à la fois impressionnant et bien peu...

Enfin, entre 10 000 et 5 000, dans trois zones géographiques distinctes – la Chine, la Mésopotamie et l'Amérique du Sud – les hommes modernes deviendront sédentaires, agriculteurs et éleveurs.

Toutes ces nouvelles données sont à la fois riches, mais encore trop incomplètes. Elles conduisent d'ores et déjà à reconsidérer l'origine des hominidés anciens et leur histoire dans le cadre de nouveaux paradigmes. Quels que soient ceux qui seront proposés, la discontinuité de nos données montre à tous les paléontologues qu'il faut continuer à faire du terrain afin de mettre au jour de nouveaux fossiles. Comme Toumaï et ceux qui ont été découverts jusqu'à présent, ils éclaireront notre évolution et confirmeront sûrement que nous sommes tous des Africains... et hors d'Afrique tous des migrants... ■

### BIBLIOGRAPHIE

M. Brunet, **Nous sommes tous des Africains**, Odile Jacob, 2016.

M. Brunet *et al.*, **A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa**, *Nature*, vol. 418, pp. 145-151, 2002.

M. Brunet *et al.*, **The first australopithecine 2500 kilometers west of the Rift Valley (Chad)**, *Nature*, vol. 378, pp. 273-275, 1995.

2002

# La conjecture de Poincaré vaincue

Une célèbre conjecture de topologie énoncée en 1904 par Henri Poincaré résistait aux assauts des chercheurs – jusqu'à ce que Grigori Perelman, mathématicien russe doté d'une personnalité étonnante, prouve l'hypothèse de Poincaré tout en démontrant une conjecture plus vaste.

**A**vec une série de six articles entamée en 1895 et achevée en 1904, le mathématicien français Henri Poincaré créait ce qu'on appellera la topologie algébrique. Dans ce domaine des mathématiques, on s'efforce d'utiliser l'algèbre pour caractériser les propriétés topologiques d'objets et d'espaces de natures diverses. Poincaré énonça en particulier une conjecture importante portant sur les espaces de dimension 3 et qui est restée longtemps non résolue. Cette célèbre conjecture ne sera démontrée qu'en 2002-2003 par le Russe Grigori Perelman, lequel refusa les récompenses (une médaille Fields et le million de dollars de la fondation Clay) attribuées pour cet exploit.

L'énoncé de la conjecture exige certaines notions préalables. En arrondissant les angles du bord d'un carré, on peut transformer ce dernier en un cercle. On dit que le cercle et le bord du carré sont homéomorphes (c'est-à-dire qu'il existe une bijection continue entre les deux figures). Un topologue s'intéresse à ces transformations homéomorphes et aux propriétés qu'elles conservent.

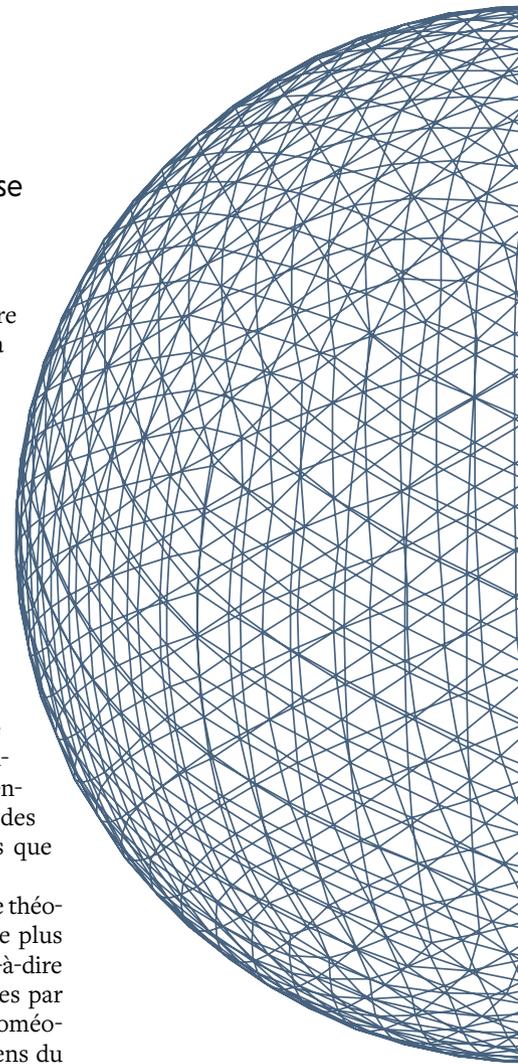
On définit ensuite une variété de dimension  $n$  comme un espace dont chaque point a un voisinage homéomorphe à  $\mathbb{R}^n$ , l'espace euclidien de dimension  $n$ . Par exemple, la sphère usuelle est une variété de dimension 2 (une surface), car au voisinage de chacun de ses points, on peut se repérer avec 2 coordonnées. Par ailleurs, un espace est dit compact quand il ne contient aucune suite de points qui file à l'infini. Ainsi, une sphère est compacte, mais une droite ne l'est pas. Enfin, un espace est « simplement connexe » lorsque tout lacet (un

chemin fermé) sur cet espace peut être déformé continûment pour se réduire à un point. La sphère est ainsi simplement connexe, mais pas le tore, puisqu'un lacet qui entoure le trou central ne peut être réduit à un point.

On a maintenant tous les éléments pour énoncer la conjecture de Poincaré, qui peut se formuler ainsi: « Toute variété compacte de dimension 3 et simplement connexe est homéomorphe à la sphère de dimension 3. » La sphère (ou hypersphère) de dimension 3 est l'équivalent, dans un espace de dimension 4, de ce qu'est la sphère usuelle (de dimension 2) dans l'espace tridimensionnel. Plus précisément, la sphère de dimension 3 (et de rayon 1) est l'ensemble des points de coordonnées  $(x, y, z, t)$  tels que  $x^2 + y^2 + z^2 + t^2 = 1$ .

La conjecture de Poincaré, devenue le théorème de Perelman, entre dans un cadre plus large: la géométrisation de l'espace, c'est-à-dire la caractérisation d'espaces topologiques par des objets géométriques qui leur sont homéomorphes. Les travaux des mathématiciens du XIX<sup>e</sup> siècle (notamment Gauss et Riemann) auront été nécessaires pour comprendre les surfaces, c'est-à-dire les variétés de dimension 2. Ceux du XX<sup>e</sup> siècle l'ont été pour les objets de dimension 3 et pour préparer le terrain à la démonstration par Grigori Perelman de la conjecture de Poincaré.

Dans les années 1970 et 1980, l'Américain William Thurston (mort en 2012) s'est rendu compte que de nombreux espaces topologiques de dimension 3 sont géométrisables. De même qu'en dimension 2, la géométrie euclidienne a



La sphère usuelle est le bord (une surface) de la boule de dimension 3. La sphère en question dans la conjecture de Poincaré est un espace tridimensionnel, qui constitue le bord de la boule de dimension 4...

## L'AUTEUR



**ÉTIENNE GHYS**  
directeur de recherche  
au CNRS, unité  
de mathématiques  
pures et appliquées,  
École normale  
supérieure de Lyon

deux «sœurs», la géométrie sphérique et la géométrie hyperbolique, en dimension 3 la géométrie euclidienne est aussi membre d'une fratrie, plus nombreuse. Outre les géométries sphérique et hyperbolique (analogues à celles de dimension 2), on compte cinq autres géométries, les géométries de Thurston.

## UN CAS PARTICULIER DE LA CONJECTURE DE THURSTON

Thurston a étudié un grand nombre d'exemples de variétés topologiques de dimension 3 et a constaté que toutes peuvent être décrites par ces huit géométries. Il a compilé des atlas et encouragé ses étudiants à établir des banques de données informatiques. Son approche était très concrète, presque expérimentale, ce qui est rare en mathématiques!

En 1976, il a formulé sa conjecture selon laquelle les variétés de dimension 3 peuvent être géométrisées par l'une de ces huit géométries. Insistons: les variétés étudiées par Thurston sont purement topologiques et ne sont munies *a priori* d'aucune métrique permettant de définir des distances. La conjecture affirme que ces objets mous que sont les variétés ont cependant une géométrie extrêmement rigide, parmi huit possibilités. La géométrie vient donc au secours de la topologie.

Thurston a lui-même démontré sa conjecture dans de nombreux cas significatifs. Il a utilisé notamment la chirurgie, un ensemble de méthodes permettant de «découper» des variétés et de les «recoller» afin de mieux les comprendre. Dans ce cadre, la conjecture de géométrisation peut s'exprimer ainsi: «Toute variété compacte de dimension 3 peut être découpée selon des tores et des sphères de dimension 2 afin d'obtenir des blocs géométrisables par l'une des huit géométries de Thurston.» La conjecture de Poincaré est alors un cas particulier de la conjecture de Thurston, celui où la variété est simplement connexe.

Ainsi, tout semblait indiquer que la preuve de la conjecture de Thurston allait être de nature topologique, fondée sur la chirurgie. Mais en 2002, un coup de tonnerre retentit avec l'entrée en scène de Grigori Perelman. Il est analyste, un spécialiste des équations aux dérivées partielles, un sujet que beaucoup de topologues avaient l'habitude de regarder de loin.

Grigori Perelman a poursuivi et mené à son terme le programme lancé par Richard Hamilton en 1982. L'idée de ce mathématicien américain était fondée sur le flot de Ricci, une équation d'évolution qui tend à homogénéiser la métrique. Prenez une variété de dimension 3, et choisissez

une métrique quelconque sur cet espace. Cette métrique n'a aucune raison d'être l'une des huit de Thurston, car elle n'est pas nécessairement homogène: elle peut être plus courbée en certains endroits que d'autres, par exemple. Le flot de Ricci appliqué à l'espace donné peut s'imaginer comme une sorte de «chauffage» pendant lequel on laisse diffuser la métrique. Cette dernière atteint alors une espèce de position d'équilibre thermique qui, on l'espère, sera une des huit métriques de Thurston.

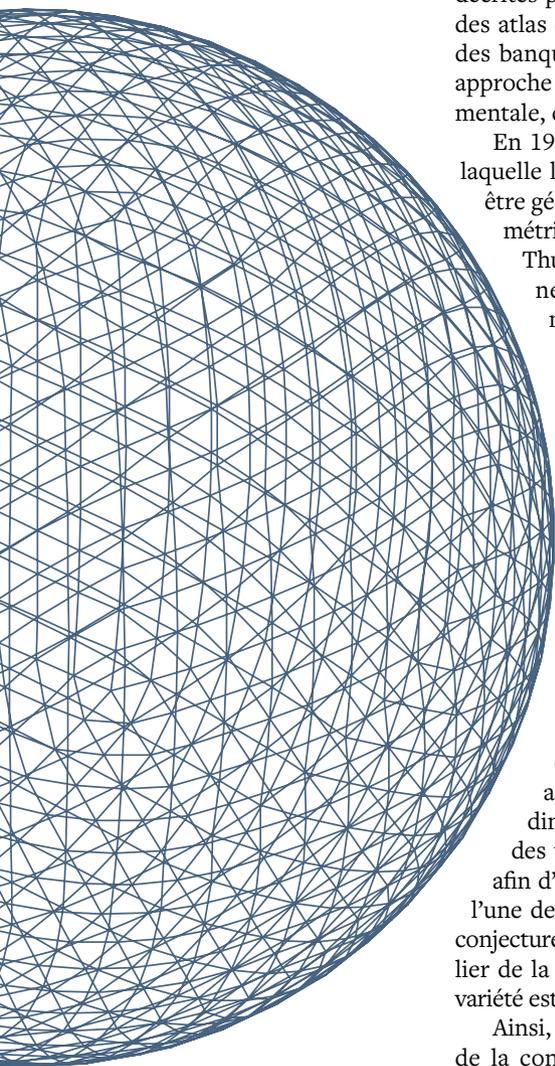
Un théorème illustre la méthode. Comment arrondir une courbe quelconque dans le plan? Un moyen simple d'y parvenir est de la «pousser» dans le sens de sa courbure. Vous poussez tous les points dans le sens de la convexité, peu quand c'est peu courbé et beaucoup lorsque c'est très courbé. En appliquant cette recette en continu, à mesure que la courbe se déforme, le théorème de Gage-Grayson-Hamilton affirme que la courbure s'équilibre et que la courbe tend à devenir un cercle. Le scénario décrit semble évident, mais ce n'est pas le cas. Pourquoi par exemple la courbe ne développerait-elle pas des points doubles?

C'est là que le bât blessait dans le programme de Hamilton. Lorsque le flot évolue, l'étalement de la courbure n'est pas uniforme. En certains points de la variété, la courbure peut s'accumuler et devenir infinie!

Grigori Perelman a décrit comment apparaissent ces singularités et comment on peut les classer. Fort de cette information, il était alors en mesure de construire, à partir du flot de Ricci, un autre flot débarrassé des singularités à l'aide d'actes de chirurgie. Ainsi s'achevait le programme de Hamilton. La conjecture de géométrisation de Thurston était donc démontrée, et avec elle la conjecture de Poincaré.

Des conjectures analogues à celle de Poincaré en dimension différente de 3 peuvent être construites sur le même modèle. Étonnamment, seul le cas  $n=3$ , c'est-à-dire la conjecture initiale de Poincaré, résistait. Pour  $n=2$ , c'est-à-dire pour les surfaces, la conjecture était bien connue de Poincaré, même si, pour en avoir une démonstration complète, il fallut attendre les années 1920. En 1961, Stephen Smale a prouvé la conjecture, par des méthodes de chirurgie, pour les dimensions supérieures ou égales à 7. Puis, en 1962, les cas  $n=5$  et 6 ont été résolus par Erik Zeeman et John Stallings par des méthodes similaires. Le cas  $n=4$  fut démontré par Michael Freedman en 1982 par une approche complètement différente. Et enfin, Grigori Perelman complétait le tableau en 2003.

Notons pour finir que la preuve de la conjecture de Poincaré, conséquence de celle de la conjecture de Thurston, est un bel exemple d'un cas fréquent en mathématiques: pour résoudre un problème, il est parfois utile de chercher la solution d'un autre plus difficile encore. ■



## BIBLIOGRAPHIE

Les articles de G. Perelman sur arXiv : [http://bit.ly/PLS481\\_Perelman](http://bit.ly/PLS481_Perelman)

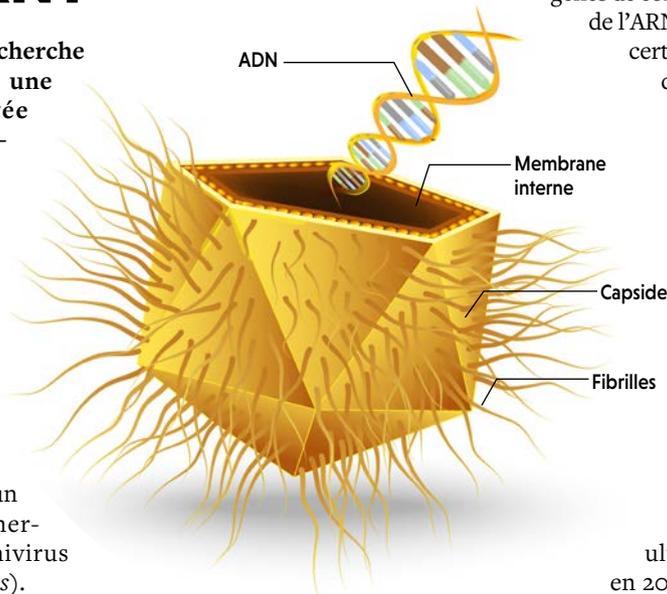
L. Bessières et al., *Images des mathématiques*, CNRS, octobre 2006 : [http://bit.ly/PLS481\\_Poincare](http://bit.ly/PLS481_Poincare)

## 2003 MIMIVIRUS, LE VIRUS QUI MIME LES BACTÉRIES

## LE PREMIER VIRUS GÉANT

**D**ans le cadre d'une recherche sur la légionellose, une amibe est prélevée dans une tour de climatisation en Angleterre. Elle se révèle infectée par un parasite inconnu qu'on assimile à une bactérie. Dix ans plus tard, en 2003, l'une des équipes qui participait à l'étude, celle de Jean-Michel Claverie et Didier Raoult, à l'université de la Méditerranée, à Marseille, s'aperçoit que ladite bactérie est en fait un virus gigantesque. Les chercheurs l'ont nommé Mimivirus (pour *Microbe mimicking virus*).

Mimivirus est plus grand que certaines bactéries; son génome est à l'avenant, avec 1262 gènes dont près d'un millier codent des protéines (alors que quelques-uns suffisent pour faire un virus). Certes, il n'est pas «vivant», car incapable de se reproduire sans parasiter le



## MIMIVIRUS, PAS MINIVIRUS

Représentation schématique du virus géant Mimivirus (ici coupé), dont la taille est d'environ 0,4 micromètre.

système de lecture de l'ADN d'une cellule ou d'interagir avec son environnement pour maintenir ses conditions internes. Mais il est doté de gènes de correction du génome, de transcription de l'ARN, ou du métabolisme du sucre dont certaines bactéries ne disposent pas, et dont un virus ne devrait pas avoir besoin! En 2008, l'équipe de Didier Raoult a découvert qu'il est lui-même parasité par un virus nommé Spoutnik.

Mimivirus appartient à une lignée très ancienne. Est-il aussi le vestige d'une forme de vie antérieure à la vie cellulaire, qui aurait perdu la capacité de se reproduire par elle-même lorsque l'apparition des premières bactéries lui a facilité la tâche? En tout cas, Mimivirus et les autres virus géants découverts ultérieurement (Mamavirus décrit en 2003, Pandoravirus en 2013, Pithovirus en 2014, Mollivirus en 2015, etc.) troublent la frontière entre virus et bactéries, donc entre l'inerte et le vivant. ■

R. C.

B. La Scola *et al.*, A giant virus in amoebae, *Science*, vol. 299, p. 2033, 2003

## 2004 LE PREMIER MATÉRIAU BIDIMENSIONNEL

## UN PLAN DE CARBONE: LE GRAPHÈNE

**L**e graphite est un millefeuille friable de couches de carbone. Une feuille unique, d'un seul atome d'épaisseur, est un cristal de «graphène» où les atomes sont liés selon un motif hexagonal. Les électrons de ces liaisons chimiques sont «délocalisés» sur l'ensemble du réseau, ce qui donne au graphène ses propriétés remarquables. La vitesse du courant électrique y est 150 fois plus élevée que dans le silicium et il conduit la chaleur 10 fois mieux que le cuivre (et mieux que n'importe quel autre matériau connu). Il est aussi près de 200 fois plus résistant à la traction que l'acier (à condition d'être sans défaut) et presque transparent.

Ces propriétés font du graphène une substance idéale pour fabriquer des composants électroniques très petits, ultra-rapides et qui chauffent peu. Ses applications potentielles – écrans tactiles souples, blindage contre les ondes électromagnétiques, batteries de nouvelle génération – sont innombrables... Encore faut-il pouvoir le synthétiser!

Dans les années 1990, on a tenté des procédés d'exfoliation du graphite comparables à l'usure de la mine de crayon sur le papier, sans jamais parvenir en dessous de quelques dizaines de couches d'épaisseur. En 2004, Andre Geim et Konstantin Novoselov, à l'université de Manchester, s'amuserent à arracher des écailles de matière d'un bloc de graphite à l'aide de

ruban adhésif. Ils remarquèrent que ces écailles avaient des épaisseurs différentes. En répétant l'expérience, ils parvinrent à isoler des écailles formées d'une seule couche atomique et à les déposer sur des plaques de silice, où ils ont pu les étudier et mesurer précisément les propriétés du matériau. L'exploit leur a valu le prix Nobel de physique en 2010 (voir aussi l'article d'Annick Loiseau, pages 36-37). ■

R. C.

K. S. Novoselov *et al.*, Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, vol. 306, pp. 666-669, 2004



# Citavi<sup>6</sup>

Toujours plus de possibilités  
pour vos travaux de recherche

- 1 Collaborez sur votre serveur privé ou sur le cloud, même hors connexion
- 2 Partagez simultanément et sans limite une même base de travail
- 3 Définissez vos droits d'accès
- 4 Importez vos références en un seul clic
- 5 Citez vos sources et créez automatiquement vos bibliographies sous Word
- 6 Recherchez facilement l'information par mots-clés



Citavi vous facilite la vie,  
mais avant tout, vos écrits scientifiques

[ritme.com/citavi](http://ritme.com/citavi)

Tél. +33 (0)1 42 46 00 42

Solution distribuée France, Suisse, Belgique et Luxembourg

**RITME**  
SCIENTIFIC SOLUTIONS

# 2006 Le microbiote, un organe à part entière

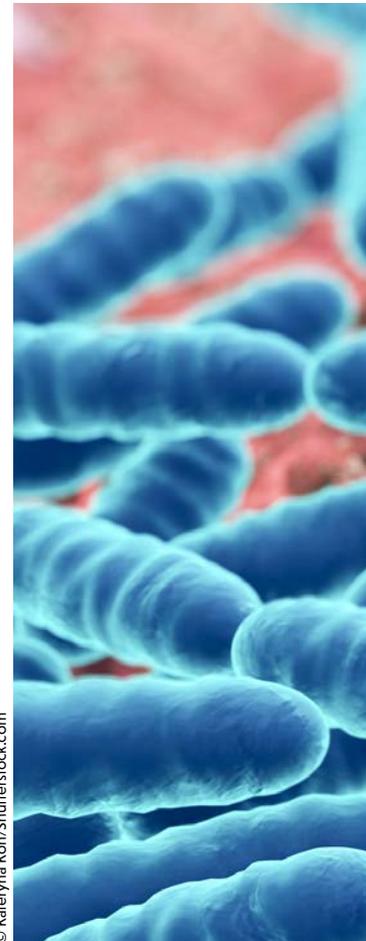
En 2006, plusieurs études démontrent un lien entre flore intestinale et obésité chez l'homme. Par la suite, les deux kilogrammes de microorganismes qui peuplent notre intestin vont se révéler impliqués dans de nombreuses pathologies, du diabète à la maladie de Parkinson en passant par la dépression.

**P**lus d'un siècle après Élie Metchnikoff, cet embryologiste engagé par Louis Pasteur, qui évoquait l'importance fonctionnelle de la flore intestinale, la communauté scientifique mondiale commence à reconnaître que la physiologie de l'homme ne se restreint pas à son génome et aux produits de son expression. C'est en 2006 qu'une série de travaux pionniers sur l'obésité a achevé de nous convaincre qu'un humain doit désormais être considéré comme un holobionte, c'est-à-dire comme une symbiose entre ses cellules et les microorganismes, unicellulaires surtout, qui vivent en lui. Initialement, les fonctions reconnues du microbiote ne concernaient que la sphère intestinale et sa contribution aux fermentations des fibres et à la production de certaines vitamines. Fondées sur la culture – principalement en anaérobiose –, les études se restreignaient à considérer seulement quelques dizaines d'espèces faciles à cultiver. Tout a changé avec le développement des techniques de la biologie moléculaire et du séquençage rapide, progrès

qui ont révélé la complexité du «microbiote», et son énorme potentiel génétique.

Sur ce chemin, les modèles expérimentaux chez l'animal ont joué un grand rôle, tout particulièrement l'utilisation de rongeurs élevés sans germe (axéniques), qui permettent des manipulations de la flore, dont le transfert de microbiotes d'humains sains ou malades. Ils ont démontré le lien fort entre une altération du microbiote appelée dysbiose et de nombreuses pathologies chroniques. L'analyse de la composition et des fonctions du microbiote dans des cohortes humaines d'individus sains ou malades par des méthodes de séquençage exhaustives couplées aux approches bio-informatiques ont confirmé l'importance de cette symbiose en santé humaine. Quelques ouvrages grand public vantant en particulier le «charme discret» de nos intestins ont permis de faire connaître le grand intérêt du microbiote pour la santé.

C'est en 2010, dans la revue *Nature*, que les premiers résultats du projet européen MétaHIT, coordonné par l'Inra, commencent à révéler toute la complexité du microbiote intestinal. Les chercheurs ont séquencé le



© Kateryna Kom/Shutterstock.com

métagénome (l'ADN de tout l'échantillon) des microbiotes intestinaux de 124 citoyens européens et décrit la formidable diversité de l'écosystème bactérien intestinal. Ainsi, chaque individu héberge plusieurs centaines d'espèces bactériennes différentes, ce qui représente environ 600 000 gènes, dont les fonctions sont encore en bonne part à élucider. Venant de l'environnement stérile qu'est l'utérus pendant la grossesse, le nouveau-né rencontre le monde microbien au moment même de sa naissance. Durant les premières années de vie, sa colonisation par les microorganismes sera influencée par le mode de sa naissance, l'hygiène de son environnement, son alimentation, les prises d'antibiotiques, la date et le moment de son sevrage, ainsi que par son alimentation. Cette colonisation se fait parallèlement au développement et à la maturation de l'immunité du bébé. À l'âge adulte, le microbiote est considéré comme une communauté stable influencée par l'alimentation et la physiologie de son hôte.

Complexe et diversifié, le microbiome (le génome du microbiote) de chaque individu représente en nombre de gènes dominants plus de 25 fois son propre génome. Une symbiose équilibrée entre l'homme et son microbiote

paraît essentielle pour le maintien d'un état sain. En revanche, la dysbiose, c'est-à-dire la perte de cette symbiose, semble, d'après les recherches de ces dernières années, associée à de nombreuses maladies: inflammations de l'intestin, cancer colorectal, maladies du foie, sclérose en plaque, maladie de Parkinson, allergies, obésité, diabète, maladies cardiovasculaires...

## DYSBIOSE ET MALADIES

La dysbiose peut être définie comme le déséquilibre du microbiote engendré par la perte d'espèces fondatrices, une réduction de la richesse ou de la diversité, une prédominance de certaines espèces pathogènes, ou une modification des capacités métaboliques de l'écosystème microbiotique. Cela se traduit par la destruction de l'écosystème bactérien et du dialogue entre le microbiote et les cellules de son hôte. Résultat: certaines des fonctions protectrices essentielles qu'exerce le microbiote normal sont perdues.

Si les premiers travaux publiés ne montraient qu'une corrélation entre les modifications du microbiote et les pathologies, la transplantation de microbiote d'un individu malade à une souris axénique a montré le rôle contributeur du microbiote à certaines maladies.

## LES AUTEURS



**HERVÉ BLOTTIÈRE  
et JOËL DORÉ**  
directeurs de recherche  
à l'institut Micalis  
de l'Inra, à Jouy-en-Josas

Ces bactéries de l'espèce *Lactobacillus* font normalement partie de la flore intestinale humaine (vue d'artiste).



> Si nous prenons l'exemple de la contribution du microbiote à l'obésité et aux maladies métaboliques, les premières évidences sont venues de l'observation de souris stériles élevées en isolateurs. Les chercheurs ont en effet constaté que de tels animaux mangent plus que leurs congénères conventionnels (avec microbiote), bougent moins, mais aussi développent moins de tissus adipeux. Ils sont aussi résistants à un régime obésogène (régime hyperlipidique riche en sucres). La colonisation par un microbiote s'accompagne d'une augmentation de la masse grasse et de l'insulinémie et d'une sensibilité au régime gras. Par ailleurs, l'analyse du microbiote de souris génétiquement obèses montre une composition très différente de celui des souris minces.

### LES TRAVAUX PIONNIERS

Les choses sont devenues palpitantes en 2006 quand l'équipe de Jeffrey Gordon de l'université Georges Washington, à Saint Louis dans le Missouri, a montré que la transplantation du microbiote de souris obèses à des souris sans germe entraînait une augmentation importante de la graisse corporelle totale, soulignant le rôle contributif du microbiote à l'obésité. La même année, les mêmes chercheurs ont conduit une étude pionnière sur une dizaine d'humains obèses. Ils ont observé une dysbiose chez les individus obèses pouvant être corrigée en partie par un régime alimentaire drastique.

Suite à cette percée, les chercheurs du consortium MetaHIT ont profité de l'existence d'une cohorte danoise pour étudier la composition du microbiote intestinal chez des humains obèses. En utilisant l'outil nouveau de la métagenomique quantitative, basé sur le séquençage massif de tous les gènes des microorganismes dominants du tube digestif de 292 Danois (obèses ou non), Emmanuelle Le Chatelier et ses collaborateurs de l'Inra ont observé qu'il existait deux groupes d'individus obèses en fonction de la richesse de leur microbiote. Cette richesse se définit par le nombre de gènes bactériens distincts présents. Les personnes ayant le microbiote le plus pauvre (autour de 300000 gènes) sont celles qui présentent l'adiposité la plus élevée, la sensibilité à l'insuline la plus réduite, la dyslipidémie la plus forte ainsi que les paramètres inflammatoires les plus péjoratifs, c'est-à-dire associés aux risques les plus élevés de développer un syndrome métabolique ou un diabète. Ce sont également les personnes qui ont pris le plus de poids au cours des dix ans de suivi de la cohorte. En revanche, les personnes ayant un microbiote riche (en moyenne 600000 gènes) semblaient en meilleure santé.

Des observations similaires ont été faites dans une petite cohorte d'une cinquantaine de Français en surpoids ou obèses. Ces patients ont été recrutés pour suivre un régime

# Il est nécessaire de développer des stratégies afin de préserver le microbiote

hypocalorique riche en protéines et apportant une grande diversité de fibres alimentaires. Mené par l'équipe de Karine Clément à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, et par les chercheurs de l'Inra et du Genoscope, le suivi au cours du temps a montré que les individus ayant un microbiote riche étaient ceux qui perdaient le plus de poids au cours des six semaines de régime et ceux pour lesquels les paramètres biologiques étaient les plus améliorés. En revanche, bien que leur nombre de gènes ait été augmenté de 25%, les personnes à microbiote pauvre perdaient peu de poids et leurs paramètres métaboliques étaient peu modifiés. Récemment, le lien fonctionnel entre les capacités du microbiote à produire des acides aminés à chaînes ramifiées et l'insulino-résistance a été démontré.

Notre propos s'est focalisé autour de l'obésité et des maladies métaboliques, mais des stratégies similaires ont été conduites dans d'autres contextes cliniques tels que les maladies inflammatoires intestinales, les maladies du foie dont la fameuse «maladie du sucre» (stéatose hépatique non alcoolique), la maladie de Parkinson... montrant un rôle contributeur du microbiote et illustrant l'importance d'une symbiose préservée. Ces travaux soulignent la nécessité de mieux comprendre les fonctions du microbiote notamment dans ses interactions avec l'hôte.

Il est aussi nécessaire de développer des stratégies préventives et thérapeutiques afin de préserver cet organe à part entière ou d'en restaurer les fonctionnalités. L'alimentation est un des leviers d'action, mais d'autres stratégies comme la transplantation de microbiote fécal sont également à l'étude. À cet égard, cette approche intéressante a permis d'obtenir des résultats spectaculaires chez les patients ayant des infections récurrentes à *Clostridium difficile*.

En cent ans, le chemin parcouru pour comprendre l'holobionte humain a été considérable. Un chemin que Metchnikoff aurait été passionné de suivre! ■

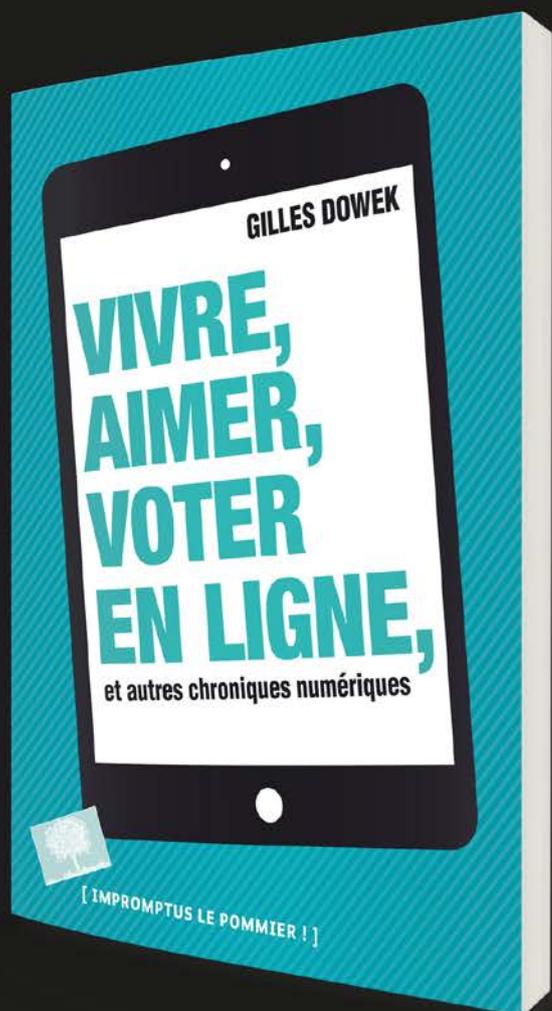
### BIBLIOGRAPHIE

R. Ley et al.,  
**Human gut microbes associated with obesity**,  
*Nature*, vol. 444,  
pp. 1022-1023, 2006.

M. Bajzer et R. Seeley,  
**Obesity and gut flora**,  
*Nature*, vol. 444,  
pp. 1009-1010, 2006.

Livre  
conseillé par  
POUR LA  
**SCIENCE**

Retrouvez *Homo Informaticus*,  
la chronique de **Gilles Dowek**,  
en version livre !



Quoi de mieux, pour appréhender l'ère numérique dans laquelle nous sommes entrés de plain-pied, que des chroniques qui, l'une après l'autre, nous racontent cette nouvelle façon de vivre, si différente de celle des humains qui vécurent au  $xx^e$  siècle ?

176 pages, 12 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site  
[www.editions-lepommier.fr](http://www.editions-lepommier.fr)



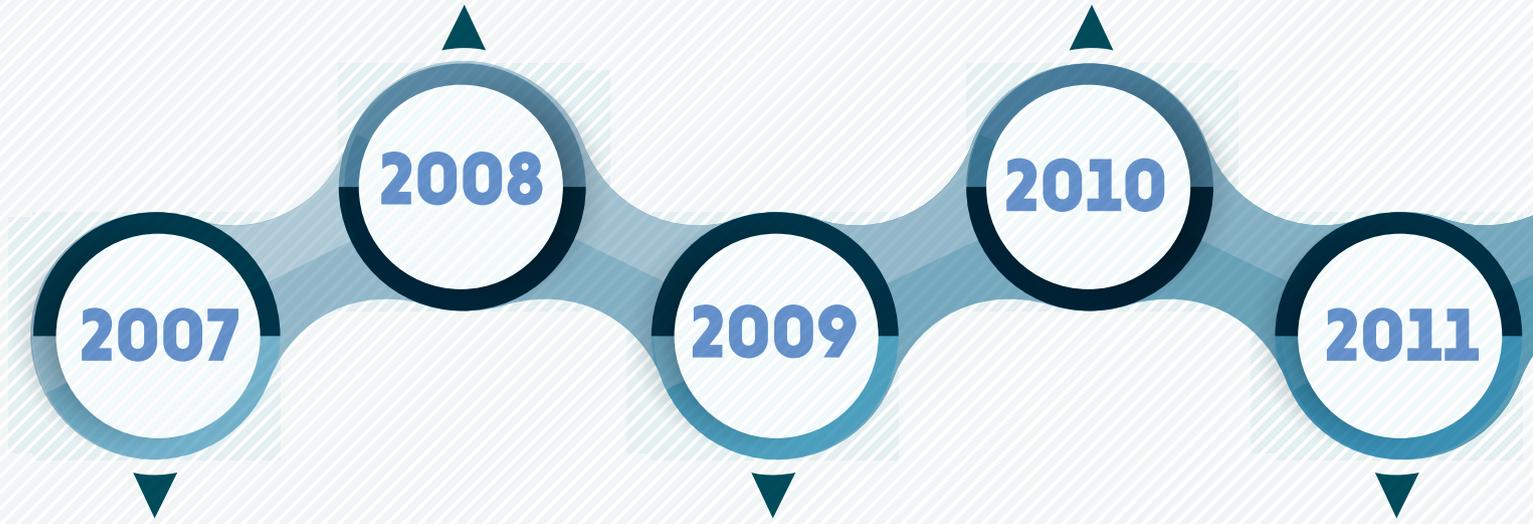
# 2007



© Dalshe / shutterstock.com

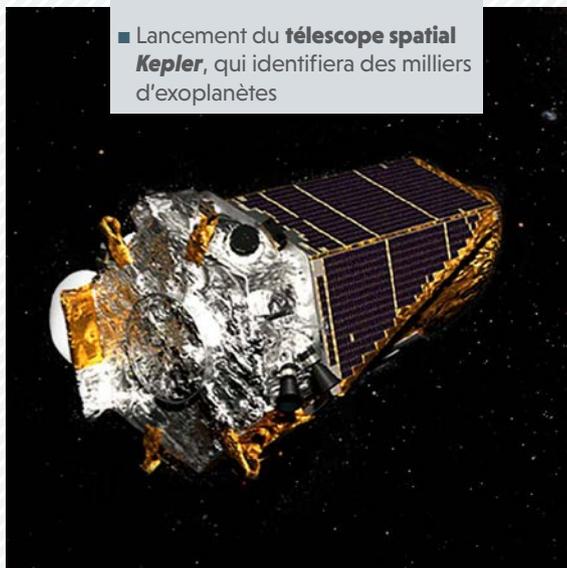
- La **Réserve mondiale de semences du Svalbard**, sur l'île norvégienne du Spitzberg, est inaugurée
- Ngô Bảo Châu (médaille Fields en 2010) prouve un lemme fondamental du **programme de Langlands**
- Le **collisionneur LHC** du Cern est mis en service

- La Commission internationale de stratigraphie met en place la version la plus avancée de la **chronologie isotopique**
- Une **cellule artificielle** est obtenue en insérant un génome bactérien de synthèse dans une bactérie **p. 85**
- Un gisement au Gabon révèle des fossiles de **microorganismes pluricellulaires** vieux de 2,1 milliards d'années, un record



- Obtention de **cellules souches pluripotentes induites** à partir de cellules humaines adultes **p. 84**
- L'équipe de Craig Venter annonce la **synthèse d'un chromosome** de bactérie
- Un **observatoire solaire** datant du III<sup>e</sup> siècle avant notre ère est identifié sur le site de Chanquillo, au Pérou

- La **glycine** (un acide aminé) est identifiée dans de la poussière cométaire collectée par la sonde *Stardust*
- Lancement du **télescope spatial Kepler**, qui identifiera des milliers d'exoplanètes



© Nasa / Jpl - Caltech

- Des fossiles montrent que **la plume est apparue avant le vol** chez les dinosaures **p. 85**
- Présentation des premiers résultats du **satellite Planck** sur le fond diffus cosmologique **p. 86**
- Des géophysiciens dressent une carte des **dessous de la calotte glaciaire** de l'Antarctique
- Des **microfossiles vieux de 3,4 milliards d'années** sont mis au jour

# - 2016



© demarcomedia / shutterstock.com

■ Mise en évidence du **boson de Higgs** au Cern **p. 90**

■ Invention de la technique **CRISPR-Cas9** pour manipuler l'ADN **p. 92**

■ Sur Mars, le rover **Curiosity**, de la Nasa, envoie ses premières images et données

■ Un prix Nobel récompense les recherches sur les **diodes électroluminescentes** bleues, tandis que ces sources de lumière (les leds) se généralisent

■ Premier traitement en France de l'**hépatite C** avec des antiviraux à action directe, qui s'avèrent efficaces à 90 %.

■ La grotte de Bruniquel, en France, révèle **des structures disposées il y a 180 000 ans** par des Néandertaliens

■ Une **intelligence artificielle** bat un champion du monde du jeu de go **p. 100**

■ Des **traces de vie vieilles de 3,7 milliards d'années** sont repérées au Groenland

■ La sonde spatiale **Juno** est mise en orbite autour de Jupiter

2012

2013

2014

2015

2016

■ Le **génomme néandertalien** est séquencé **p. 92**

■ Le rapport du Giec confirme avec une certitude de 95 % l'origine anthropique du **réchauffement climatique** **p. 94**

■ Premier foie humain produit par **impression 3D**

■ Des astronomes estiment que la Voie lactée contient quelque **10 milliards de planètes** où l'eau pourrait subsister à l'état liquide



© eLife 2017, doi:10.1101/114232

■ Des **outils de pierre datant de 3,3 millions d'années**, antérieurs au genre *Homo*, sont mis au jour au Kenya

■ L'équipe de Lee Berger décrit un nouvel hominidé fossile trouvé en Afrique du Sud, ***Homo naledi***

■ L'observatoire américain *Ligo* détecte, pour la première fois, des **ondes gravitationnelles** **p. 98**

# DES CELLULES ADULTES REPROGRAMMÉES EN CELLULES SOUCHES

**T**ous les organismes multicellulaires commencent leur vie sous la forme d'une cellule unique qui se multiplie pour former des copies d'elle-même. Plus tard, chez l'animal, ces cellules filles se spécialisent pour devenir, qui des globules rouges, qui des cellules osseuses ou musculaires... Mais certaines restent en réserve, sans spécialisation, afin de pouvoir remplacer leurs congénères: ce sont les «cellules souches», capables de se spécialiser en temps voulu et de se reproduire par division cellulaire.

En principe, la spécialisation des cellules est un phénomène irréversible. D'ailleurs, dans un organisme adulte, les cellules souches sont rares et ne font habituellement pas tout: elles sont le plus souvent soit unipotentes (elles ne peuvent remplacer qu'un type particulier de cellule), soit multipotentes (elles peuvent se spécialiser dans une gamme restreinte de types, par exemple les cellules sanguines pour les cellules souches dites hématopoïétiques). Il y a de très bonnes raisons à cela: pour empêcher la prolifération incontrôlée des cellules, l'existence de mécanismes qui répriment les capacités qu'elles avaient au stade embryonnaire est nécessaire!

## 200

TYPES DIFFÉRENTS DE CELLULES ENVIRON COMPOSENT LE CORPS HUMAIN. LA GRANDE MAJORITÉ D'ENTRE EUX EST CONSTITUÉE DE CELLULES SPÉCIALISÉES. LES CELLULES SOUCHES NE SONT QU'UNE PETITE MINORITÉ.

C'est pourquoi la recherche médicale sur les cellules souches est restée longtemps limitée à l'utilisation de cellules prélevées sur des embryons. Cela posait des problèmes éthiques liés au fameux «statut de l'embryon», mais aussi des problèmes pratiques puisqu'une greffe de cellules souches provenant d'un embryon encourt toujours le risque que le système immunitaire du patient la rejette.

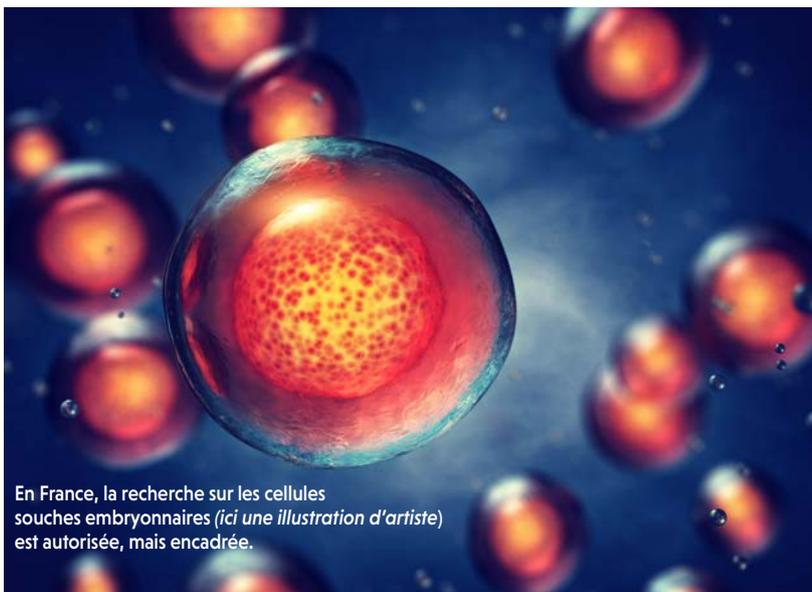
Toutefois, l'existence des cancers – des pathologies dans lesquelles des cellules arrêtent de jouer leur rôle dans l'organisme pour se multiplier de façon anarchique – suggérait qu'il était possible de contourner le mécanisme de répression des cellules souches. Des cellules adultes pourraient-elles être «reprogrammées» pour devenir au moins pluripotentes (capables de donner toutes les cellules spécialisées, sauf celles des organes externes transitoires tel le placenta qui accompagne l'embryon pendant sa croissance)?

En 2006, Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto, tenta une méthode simple sur des cellules provenant du derme d'une souris adulte dans lesquelles il injecta, *via* un rétrovirus, des facteurs de transcription particuliers. Les facteurs de transcription sont des protéines qui agissent lors de la «traduction» de l'ADN en ARN messenger et, selon les cas, activent ou au contraire répriment l'expression d'un gène. Le cocktail utilisé par Shinya Yamanaka visait à provoquer l'expression de quatre gènes (*Oct3/Oct4*, *SOX2*, *KLF4* et *c-myc*) réprimés dans les cellules adultes, mais qui s'expriment dans les cellules embryonnaires. Il obtint ainsi des cellules pluripotentes induites. En 2007, l'expérience est répétée sur des cellules prélevées dans le derme humain qui, une fois rendues pluripotentes, sont conduites à se spécialiser en... neurones!

Ce résultat, qui offre des perspectives vertigineuses à la médecine, a été récompensé en 2012 par le prix Nobel de physiologie ou médecine, décerné à Shinya Yamanaka et à John Gurdon, qui a montré en 1962 que la spécialisation des cellules était réversible. ■

R. C.

K. Takahashi et S. Yamanaka, *Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors*, *Cell*, vol. 126 (4), pp. 663-676, 2006



En France, la recherche sur les cellules souches embryonnaires (ici une illustration d'artiste) est autorisée, mais encadrée.

## UNE PREMIÈRE CELLULE ARTIFICIELLE

**E**n 2010, l'équipe de Craig Venter, l'un des pionniers du séquençage du génome humain, reconstitue le génome complet de la bactérie *Mycoplasma mycoides*. Les chercheurs ont ensuite introduit cet ADN de synthèse à l'intérieur de la membrane d'une bactérie proche – *Mycoplasma capricolum* – et le micro-organisme hybride ainsi créé s'est révélé viable!

L'audace du procédé a stimulé la fabrication de cellules artificielles, désormais une branche active de la recherche biomédicale. Récemment, l'équipe de Craig Venter a même réussi à synthétiser une cellule capable de se répliquer qui ne comporte que 473 gènes (le génome humain en contient environ 20000...). Ces gènes ont été choisis pour permettre en principe à une bactérie de survivre, ce qui a fonctionné.

Aujourd'hui, la stratégie d'« édition du génome » adoptée par l'équipe de Craig Venter pour trouver le génome minimal nécessaire à



Dans cet amas de cellules artificielles, les plus grosses cellules à génome minimal mesurent environ un micromètre de diamètre.

la vie est concurrencée par la méthode CRISPR-Cas9, qui permet de modifier à volonté un génome cellulaire (voir page 92).

Il n'empêche... Depuis qu'en 1828 Friedrich Wöhler synthétisa l'urée – jusque-là produite exclusivement par un foie de vertébré –, l'idée qu'une « force vitale » est à l'œuvre dans les organismes a décliné parmi les biologistes. Ceux-ci ont en effet constaté que le vivant semble plutôt être un cas particulièrement complexe et ordonné de chimie du carbone en milieu aqueux. Dès lors, la biologie de synthèse ne pouvait qu'apparaître. La fabrication à partir d'un génome de synthèse d'une première cellule vivante capable de se reproduire en constitue sans aucun doute une étape majeure. ■

R. C.

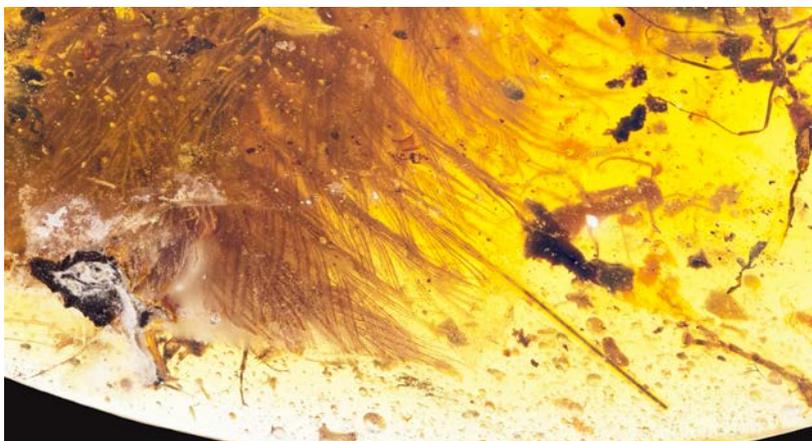
D. Gibson *et al.*, Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, *Science*, vol. 329, pp. 52-56, 2010

## LA PLUME AVANT LE VOL

**D**ès 1859, le paléontologue britannique Thomas Huxley proposa que les oiseaux modernes descendaient des dinosaures. Il se fondait sur les analogies anatomiques existant entre les dinosaures théropodes, le dinosaure volant archéoptéryx et les oiseaux actuels. Son hypothèse conférait aux dinosaures une « modernité » (certains d'entre eux existaient encore!) que beaucoup n'étaient pas prêts à accorder à ces archaïques « lézards géants ». Elle rencontra donc une énorme résistance, mais les preuves en sa faveur se sont ensuite accumulées pendant un siècle et demi...

Puis, dans les années 1990, on découvrit dans le Liaoning, en Chine, des fossiles de théropodes non aviens, mais porteurs de plumes. Mises au jour en 1999, les empreintes de *Shuvuuia deserti* révélèrent des traces de kératine bêta, l'un des constituants caractéristiques des plumes d'oiseaux. En 2007, on observa en outre que les plumes fossiles de *Velociraptor mongoliensis* étaient structurées de la même façon que celles des oiseaux actuels. Le dernier doute disparut en 2011, avec la découverte d'une queue emplumée de dinosaure fossilisée dans un morceau d'ambre (voir le cliché ci-dessus).

Aujourd'hui, on estime que les premières plumes constituaient une sorte de duvet iso-



Cette queue de dinosaure à plumes a été piégée dans de la résine, future ambre, au milieu du Crétacé birman. La fourmi piégée en même temps indique l'échelle de ces plumes qui, par leur structure, s'apparentent à du duvet.

lant comparable à la fourrure; puis qu'elles évoluèrent vite pour devenir aussi des moyens de communication visuelle (les répartitions structurées de divers types de pigments produisent chez les oiseaux des couleurs plus variées que la simple présence de mélanine dans les poils de mammifères). Ce n'est qu'ensuite que la légèreté et la portance des plumes ont été sélectionnées au sein de certaines lignées dinosauriennes pratiquant le vol. Les dinosaures n'ont pas du tout disparu: le nombre d'espèces d'oiseaux actuels est supérieur à celui des mammifères! ■

R. C.

R. C. McKellar *et al.*, A diverse assemblage of Late Cretaceous dinosaur and bird feathers from Canadian amber, *Science*, vol. 333, pp. 1619-1622, 2011

2011

# Planck

## sonde les débuts de l'Univers

La mission du satellite *Planck* : scruter la lumière fossile du Big Bang. Ses premiers résultats, dévoilés en janvier 2011, laissent supposer que 95 % du contenu de l'Univers nous échappe.

**B**ien racontée, l'histoire de la physique du **xx<sup>e</sup> siècle convoquerait des milliers de personnages plus ou moins célèbres.** Acceptant par avance le reproche de pécher par trop d'omissions, je veux ici mettre en avant le nom de George Gamow, pionnier de la cosmologie moderne et vulgarisateur génial, auteur d'une vingtaine de livres enthousiastes et accessibles à tous, notamment *Monsieur Tompkins au pays des merveilles* (1939).

Ce joyeux drille naquit le 4 mars 1904 à Odessa, principal port de la mer Noire. Dans le petit monde de la physique, il fut vite reconnu comme un théoricien de première classe. Changeant à plusieurs reprises de thème de recherche, il se montra inventif tout au long de sa vie, entremêlant les champs disciplinaires, traversant les lignes de partage académiques. Il faut dire que son esprit aiguisé avait la topologie d'un couteau suisse : il était multifonction, qualité sans doute nécessaire lorsqu'on s'intéresse à l'Univers et à tout ce qui s'y passe.

Après la Seconde Guerre mondiale, Gamow, alors professeur à l'université Georges Washington, à Saint Louis, aux États-Unis, s'intéressa à l'astrophysique nucléaire, et notamment à l'origine des éléments chimiques. Il pensait que la compréhension des noyaux permettrait de mieux saisir l'histoire et l'évolution de la matière : comment se sont formés, se demandait-il, les atomes d'hélium, de carbone, d'oxygène, de soufre, de fer ?

### NAISSANCE DES ÉLÉMENTS

Aidé par l'un de ses étudiants, Ralph Alpher, il émit l'hypothèse que tous ont été produits durant les premières phases, très chaudes, de l'Univers en expansion. Il y avait alors les protons, les neutrons, les électrons et les photons, filant en tous sens et se percutant régulièrement. Mais du fait de l'expansion du cosmos et du refroidissement qu'elle induisait, ces particules perdirent rapidement de l'énergie. Après seulement quelques secondes, les photons, dont l'énergie était jusque-là suffisante pour qu'ils brisent systématiquement l'union d'un proton et d'un neutron, devinrent

Fond diffus cosmologique vers 380 000 ans

Inflation

Fluctuations quantiques

©Nasa/WMAP Science Team

trop «mou» pour y parvenir. Les noyaux de deutérium (assemblages d'un proton et d'un neutron) purent donc commencer à se former sans être aussitôt détruits par l'impact d'une particule de lumière. Une fois constitués, ces noyaux de deutérium agglutinèrent à leur tour un neutron et un proton. Se formèrent ainsi des noyaux d'hélium. D'autres mariages de cette sorte allèrent ensuite bon train, permettant de constituer, par captures successives de neutrons, les divers noyaux qui existent aujourd'hui.

Au début de l'année 1948, les deux hommes étaient prêts à publier les conclusions de leur travail sur l'origine des éléments chimiques. Mais avant d'adresser leur article à la *Physical Review*, le facétieux Gamow ajouta

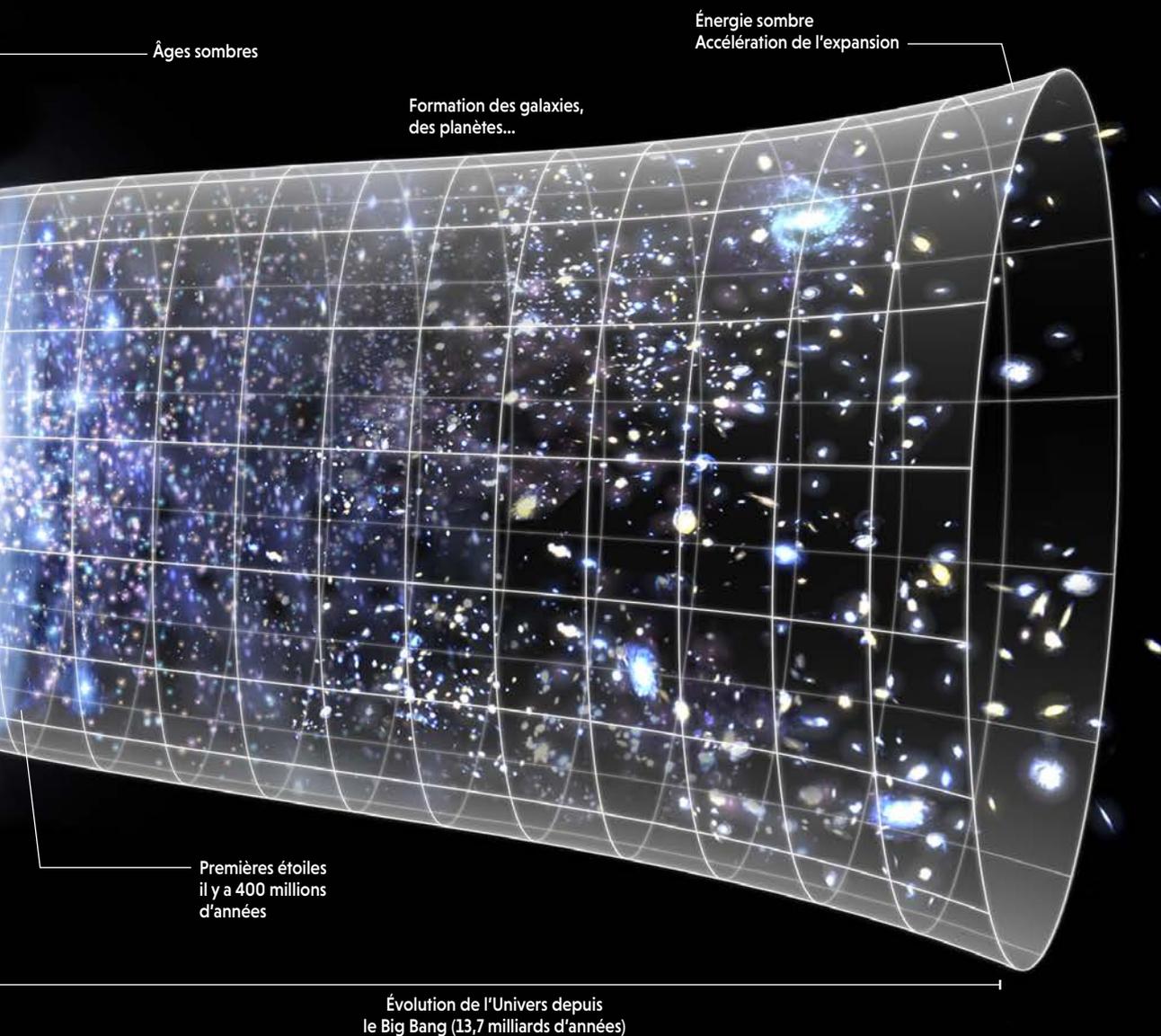
à la liste des signataires le nom de Hans Bethe, qui avait été le premier physicien à comprendre comment les étoiles produisent de l'énergie, mais sans lui demander son avis. Bethe n'avait nullement participé à leurs travaux, mais c'était pour le simple plaisir de jouer phonétiquement avec les trois premières lettres de l'alphabet grec (Alpher, Bethe, Gamow pour alpha, bêta, gamma). Gamow tenta également, mais en vain, de convaincre un autre collaborateur, Robert Herman, d'être cosignataire de l'article à condition de changer son nom en... Delter (pour delta). Comme de bien entendu, cet article, qui demeurera célèbre sous le nom de «papier  $\alpha\beta\gamma$ », sera daté du 1<sup>er</sup> avril.

L'hypothèse révolutionnaire de Gamow devra toutefois être corrigée ultérieurement: >

## L'AUTEUR



**ÉTIENNE KLEIN**  
physicien,  
directeur du Larsim  
(Laboratoire  
de recherche  
sur les sciences  
de la matière),  
au CEA, à Saclay



➤ seuls les noyaux les plus légers, comme l'hydrogène, le deutérium ou l'hélium, ont pu se former dans l'Univers primordial selon le processus qu'il avait envisagé. Car après trois minutes, le contenu du cosmos était déjà tellement dilué par son expansion que les noyaux, trop éloignés les uns des autres, n'avaient plus la possibilité de se rencontrer, de s'agglutiner et de former des noyaux plus gros tels que le carbone ou l'oxygène. Les noyaux plus lourds n'ont pu apparaître que bien plus tard, des millions d'années après, certains (jusqu'aux noyaux de fer) dans les étoiles, les autres (jusqu'aux noyaux d'uranium) au cours d'explosions d'étoiles très massives, les *supernovæ*.

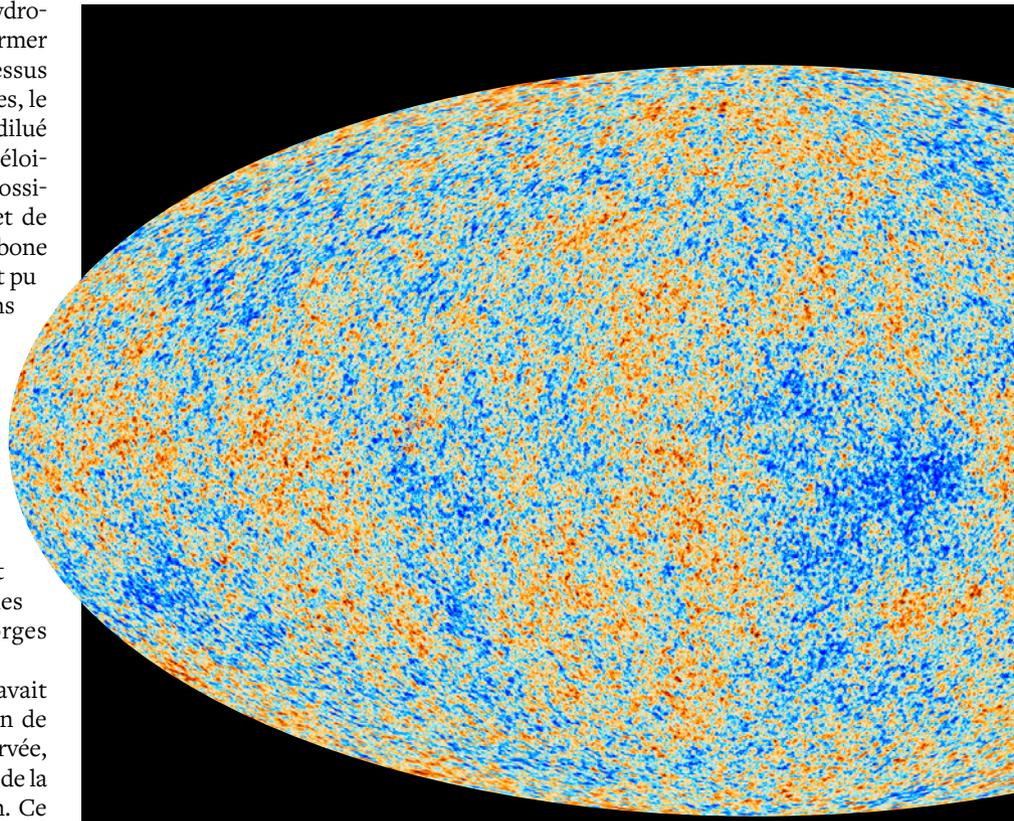
Reste que Gamow était sur la bonne voie. Son travail est d'ailleurs considéré comme le véritable lancement de l'actuelle théorie du Big Bang. Bien sûr, il s'appuyait sur des découvertes antérieures, certaines majeures, notamment celles de Georges Lemaître dans les années 1930.

Cet abbé et mathématicien belge avait remarqué un lien étroit entre l'expansion de l'Univers, qui venait tout juste d'être observée, et certaines conséquences mathématiques de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Ce constat l'avait amené à formuler une hypothèse audacieuse: si l'Univers est aujourd'hui en expansion, il a dû être beaucoup plus dense dans le passé; initialement, il devait même être condensé en un «atome primitif» que des fractionnements successifs ont fini par façonner tel que nous le voyons aujourd'hui.

Gamow enrichit cette hypothèse de l'atome primitif en faisant intervenir une nouvelle grandeur physique, la température: dans son passé lointain, comprit-il, l'Univers était non seulement beaucoup plus dense qu'aujourd'hui, mais aussi beaucoup plus chaud, donc beaucoup plus énergétique. En clair, à ses débuts, la matière a dû connaître une fièvre extraordinaire.

## LA PREMIÈRE LUMIÈRE COSMIQUE

Gamow passa l'été 1948 à Los Alamos, tandis que Ralph Alpher et Robert Herman demeurèrent à l'université Georges Washington, où ils développèrent certaines des intuitions de leur professeur. Cela les conduisit à franchir un nouveau pas crucial: bien après la formation des noyaux les plus légers, lorsque l'Univers en expansion s'est refroidi à quelques milliers de degrés, il a dû brusquement devenir transparent et laisser échapper sa première lumière. En d'autres termes, selon Alpher et Herman, il devait exister une descendance de l'Univers primordial sous la forme d'un rayonnement vestige, refroidi par l'expansion, semblable à celui d'un corps noir dont la température serait très basse, égale à 5 kelvins d'après leurs calculs.



Les fluctuations de température du fond diffus cosmologique enregistrées par *Planck* témoignent des conditions qui régnaient dans l'Univers lorsqu'il était âgé de 380 000 ans.

La suite de l'histoire leur donnera raison: ce rayonnement sera découvert par hasard, en 1965, par Arno Penzias et Robert Wilson, à une température toutefois plus basse, proche de 3 kelvins.

Les scénarios de Big Bang remportèrent là, avec succès, leur premier grand test. Mais César, on le sait bien, n'obtient pas toujours ce qui devrait lui revenir, du moins pas intégralement: le 8 décembre 1978, un an après la création de *Pour la Science*, ce sont Arno Penzias et Robert Wilson qui reçurent le prix Nobel de physique, et non Gamow et Lemaître, décédés tous les deux une dizaine d'années plus tôt.

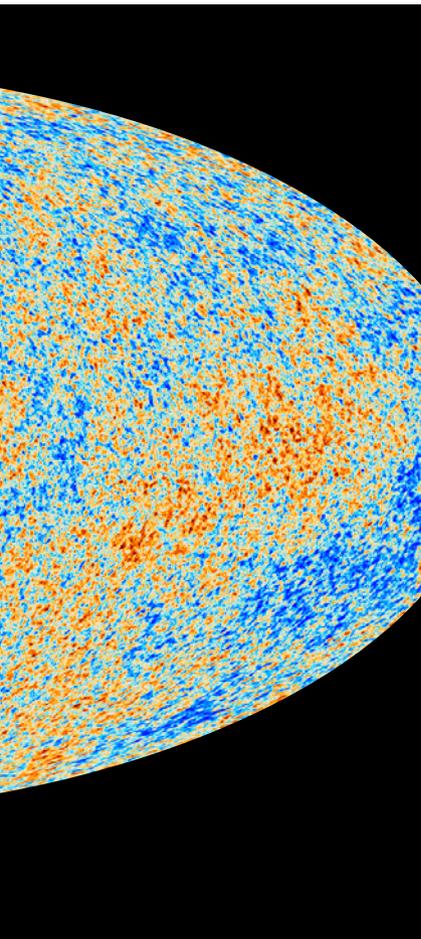
Les physiciens étaient encore loin d'avoir compris tout ce que le «fond diffus cosmologique» pouvait leur révéler de l'Univers. En 2009, le satellite *Planck* fut lancé pour étudier ce rayonnement, aussi qualifié de «fossile», avec une meilleure précision que les missions spatiales antérieures, *Cobe* et *WMAP*.

Mais qu'est-ce au juste que ce rayonnement? Pendant les 380 000 ans qui ont suivi le Big Bang, la lumière ne pouvait pas se propager librement dans l'espace: la densité de matière était telle que les photons ne cessaient d'y interagir avec des particules de matière, de sorte que l'Univers était un milieu opaque à sa propre lumière. Le

## BIBLIOGRAPHIE

E. Klein, *Il était sept révolutions*, Flammarion, 2016.

Collaboration *Planck*, *Planck early results*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 536, 2011.



refroidissement continu du cosmos a toutefois fini par provoquer un changement de phase après 380 000 ans d'expansion, lorsque la température de l'Univers n'était plus que de 3 000 kelvins: les électrons furent capturés par les noyaux, formant ainsi des atomes électriquement neutres. Comme les photons interagissent peu avec les atomes, ils purent enfin se propager librement dans l'Univers, sans rencontrer d'obstacle à chacun de leurs pas.

C'est ce rayonnement qui s'est libéré de la matière qui constitue aujourd'hui le fond diffus cosmologique. S'il intéresse tant les cosmologistes, c'est parce qu'il contient une mine d'informations, sa structure ayant dû conserver la trace d'événements cosmiques antérieurs. Notamment, la température du fond diffus cosmologique n'est pas parfaitement homogène à travers le ciel: on observe d'infimes fluctuations (de l'ordre de  $10^{-5}$  kelvin) autour d'une valeur moyenne (voir la figure ci-contre). Les informations statistiques de ces fluctuations révèlent de nombreuses informations sur l'Univers.

Du 10 au 14 janvier 2011, une conférence internationale s'est tenue à Paris pour présenter les premières mesures du satellite *Planck*. La mission et la prise de données se sont poursuivies jusqu'en 2013.

Les résultats de *Planck*, dûment analysés et rendus publics en mars 2013 et en décembre 2014, confirment ce que l'on savait

D'après les équations de la relativité générale d'Einstein, la courbure spatiale de l'Univers est déterminée par la densité de matière et d'énergie qu'il contient. Mais alors, comment se fait-il que la densité moyenne de l'Univers soit exactement celle qui correspond à une courbure globalement nulle de sa géométrie?

## UN DÉBUT FULGURANT

Une hypothèse *ad hoc*, développée en 1981 par Alan Guth et Alexei Starobinsky, permet de résoudre ce problème. Selon eux, l'Univers primordial aurait connu une gigantesque «inflation», c'est-à-dire une phase d'expansion incroyablement accélérée lorsque sa densité était extrêmement élevée: les distances auraient été multipliées par un facteur énorme, de l'ordre de  $10^{50}$ , en une durée très courte, de l'ordre de  $10^{-32}$  seconde! Une telle inflation explique la platitude de l'Univers par un simple effet de perspective: le cosmos s'étant considérablement agrandi en une fraction de seconde, sa courbure paraît localement moins importante, de la même façon que la surface d'un ballon gonflé apparaît presque plate si on la regarde sur une toute petite portion. L'Univers observable ne serait qu'une toute petite partie de l'Univers réel...

Les résultats de *Planck* précisent également les proportions des composants actuels de l'Univers: 4,9% de matière ordinaire, 26,6% de matière noire, 68,6% d'énergie sombre. Mais de quoi cette matière noire et cette énergie sombre, qui impriment leur marque sur la dynamique de l'Univers, sont-elles faites? Maintes hypothèses sont proposées, qui devront être testées. Ce travail constitue l'enjeu combiné de la cosmologie, de l'astrophysique et de la physique des particules.

En fait, nous sommes en présence d'une alternative. Soit nous postulons que les lois de la gravitation telles que nous les connaissons sont les bonnes, et dans ce cas il reste à identifier la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre. Soit nous acceptons de remettre en cause les lois de la gravitation pour éviter d'avoir à peupler l'Univers d'objets inconnus, de mystérieux fantômes. Dans ce cas, il faut modifier ces lois de façon à rendre compte des observations sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'existence de ces composantes hypothétiques.

Laquelle de ces deux voies finira par s'imposer? Nul ne sait encore dire si les problèmes de la matière noire et de l'énergie sombre constituent, pour la physique, une crise législative (de l'exactitude ou de l'universalité des lois) ou une crise ontologique (de la complétude de son mobilier actuel). Mais dans les deux cas, son *corpus* théorique ne devrait pas en sortir indemne. Les aventures de Monsieur Tompkins sont bien loin d'être terminées... ■

# Contenu de l'Univers: 68,6 % d'énergie sombre, 26,6 % de matière noire, et près de 4,9 % de matière ordinaire

déjà, à savoir que la géométrie de l'Univers observable est euclidienne, c'est-à-dire plate comme une limande. *A priori*, sa courbure pouvait être positive, négative, ou rigoureusement nulle. Or c'est cette dernière situation, la plus singulière qui soit, qui avait été constatée: dans l'Univers, deux parallèles ne se rencontrent jamais. Quelle étrange coïncidence...

2012

# Le boson de Higgs

## Aux origines de la masse des particules

Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du Cern annonçaient la découverte exceptionnelle – et longtemps espérée – d'une particule, le boson de Higgs, un acteur crucial dans la théorie des interactions fondamentales.

**O**u plutôt, le boson de Brout-Englert-Higgs, devrait-on dire... La particule devenue célèbre sous le nom de « boson de Higgs » a été mise en évidence au Cern, près de Genève, au terme de plusieurs dizaines d'années d'une quête menée par de nombreux physiciens. On dit souvent que ce boson est à l'origine de la masse, au moins en partie, mais de quoi s'agit-il plus précisément ?

Les physiciens des particules cherchent à identifier les constituants fondamentaux de la matière, et aussi à comprendre les forces qui agissent sur eux, les lois qui les gouvernent et les régularités – des symétries – caractérisant ces lois. Aujourd'hui, le modèle standard de la physique des particules rassemble ces éléments dans un cadre théorique dont la cohérence nécessite le boson de Higgs. Ce modèle décrit comment un petit nombre de particules élémentaires (quarks, électron, neutrinos...) sont soumises à trois interactions fondamentales. L'interaction électromagnétique de deux particules chargées s'interprète comme le résultat de l'échange d'un autre type de particules, les photons. L'« interaction forte » lie les quarks très solidement pour former les protons et les neutrons, et maintient ceux-ci dans les noyaux atomiques. L'« interaction faible » est capable de changer la nature

d'une particule et est responsable, par exemple, de la désintégration du neutron en un proton (avec l'émission d'un électron et d'un antineutrino). À l'échelle subatomique, la quatrième force fondamentale, la gravitation, est extrêmement faible par rapport aux autres interactions, et le modèle standard ne la prend pas en compte.

### LES SYMÉTRIES, LE LANGAGE DES PARTICULES

Dans les années 1940, la reformulation de l'électromagnétisme dans un cadre quantique, l'électrodynamique quantique (QED), a préfiguré les principes qui régissent le modèle standard. Les équations décrivant cette interaction obéissent à certaines symétries, et on peut y procéder à des transformations mathématiques particulières, des « transformations de jauge », sans modifier les grandeurs observables telles que le champ électrique et le champ magnétique. L'invariance vis-à-vis des transformations de jauge est essentielle pour la cohérence de la théorie électromagnétique au niveau quantique, notamment pour tenir compte des échanges de plusieurs photons entre particules chargées. Elle est reliée par des théorèmes généraux à la loi de conservation de la charge électrique, et au fait que le photon est de masse nulle, dont il résulte que la force électromagnétique est de longue portée.

### L'AUTEUR



**PIERRE FAYET**  
directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure, à Paris

### BIBLIOGRAPHIE

Collaboration ATLAS, **Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson [...]**, *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 1-29, 2012.

Collaboration CMS, **Observation of a new boson at a mass of 125 GeV [...]**, *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 30-61, 2012.

Le succès de la description de la QED a conduit les physiciens à rechercher une théorie analogue pour les interactions faible et forte. C'est ainsi que s'est construit, dans la période 1960-1973, le modèle standard de la physique des particules. Celui-ci repose notamment sur une symétrie de jauge dite électrofaible, qui relie les interactions faible et électromagnétique. L'interaction forte, elle, repose sur une autre symétrie de jauge et est décrite par l'échange de gluons entre les quarks.

L'interaction faible a une portée très courte, de l'ordre de  $10^{-18}$  mètre, mille fois moins que la taille d'un proton. Les lois de la physique quantique imposent alors que les particules médiatrices de cette force, les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$  prédits par le modèle, aient une masse importante. Le premier signe de l'existence du boson  $Z$  a été la mise en évidence du courant neutre faible associé par l'expérience *Gargamelle* au Cern, en 1973. La présence des bosons intermédiaires  $W$  et  $Z$  a ensuite été confirmée de façon spectaculaire en 1983 (voir l'article Les bosons  $w$  et  $Z$  mis en évidence, page 34). Ces succès ont donné aux physiciens une grande confiance dans la pertinence du modèle standard, au moins dans ses aspects essentiels.

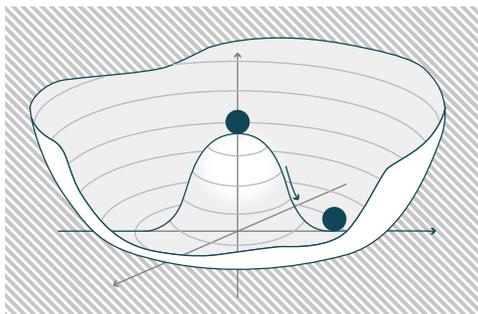
## LE DILEMME DES BOSONS MASSIFS

Il restait cependant en suspens une question centrale. Les symétries de jauge assurant la cohérence de la théorie auraient dû exiger que les bosons  $W$  et  $Z$  soient de masse nulle, ce qui ne pouvait pas être le cas. Pour résoudre cette contradiction, Steven Weinberg, en 1967, a fait appel à un mécanisme imaginé trois ans plus tôt par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs. Cette idée repose sur un champ dit scalaire, le champ de Higgs, dont les quatre composantes sont reliées par la symétrie électrofaible. Ce champ induit une brisure spontanée de la symétrie électrofaible (voir l'encadré ci-contre), qui permet à l'interaction faible de se différencier de l'interaction électromagnétique et de devenir une force à très courte portée. Trois des composantes du champ de Higgs se métamorphosent alors : elles disparaissent tout en conférant une masse aux bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ . Chaque particule en interaction avec le champ de Higgs acquiert aussi une masse, d'autant plus élevée qu'elle interagit fortement avec ce champ.

Mais quid de la quatrième composante ? Si elle est bien présente, elle doit décrire une nouvelle sorte de particules, le boson de Brout-Englert-Higgs, un peu comme le champ électromagnétique décrit le photon. C'est cette particule essentielle à la cohérence du modèle

## LE MÉCANISME DE HIGGS POUR BRISER LA SYMÉTRIE

L'ingrédient fondamental du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, qui donne leur masse aux bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ , est un champ scalaire : le champ de Higgs. Un champ scalaire est un objet mathématique qui associe une valeur à tout point de l'espace et à chaque instant, à l'instar d'une carte des températures. Le champ de Higgs est universel, présent partout dans l'Univers.



standard que les expériences *Atlas* et *CMS* ont détectée en 2012, au grand collisionneur LHC du Cern. L'existence de cette particule de 125 gigaélectronvolts (plus de 100 fois la masse d'un proton) a ainsi confirmé la pertinence du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible utilisé dans le modèle standard.

Tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Notamment, l'origine des très petites masses des neutrinos, la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre (qui représentent 95 % du contenu de l'Univers) restent à élucider. L'existence du champ de Higgs, et de son boson associé, s'accompagne aussi de nombreuses questions. De fait, c'est seulement dans le cadre des théories supersymétriques que l'introduction de champs scalaires fondamentaux devient naturelle. Ces théories d'extension du modèle standard, développées à partir des années 1970, prévoient que toutes les particules connues soient associées à des « superpartenaires » plus lourds, actuellement inconnus, qui font l'objet de recherches intenses au LHC. ■

Les équations de la théorie présentent certaines symétries. C'est notamment le cas du potentiel scalaire qui indique l'énergie potentielle du champ de Higgs en fonction de la valeur de ce champ. La forme du potentiel, souvent qualifiée de chapeau mexicain (ci-dessous), fait que la position centrale, pour laquelle la valeur du champ est nulle (correspondant au sommet du chapeau) est une position d'équilibre instable, car l'énergie n'y est pas minimale. Le champ évolue donc spontanément vers une valeur d'équilibre non nulle, qui correspond à une valeur minimale du potentiel. Si l'expression du potentiel est symétrique, ce n'est pas le cas des positions d'équilibre possibles du champ ; toutes sont équivalentes, mais aucune ne présente la symétrie initiale du potentiel. On parle de brisure spontanée de symétrie.

Cette brisure a d'importantes conséquences. L'interaction électrofaible se transforme en deux forces distinctes : l'interaction électromagnétique et l'interaction faible. La première est véhiculée par le photon, de masse nulle, et la seconde est transmise par les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ , qui acquièrent une masse. Les particules qui composent la matière (quarks, électron, etc.) acquièrent aussi une masse en interagissant avec le champ de Higgs : plus le couplage est élevé, plus la masse est importante.

## CRISPR-CAS9

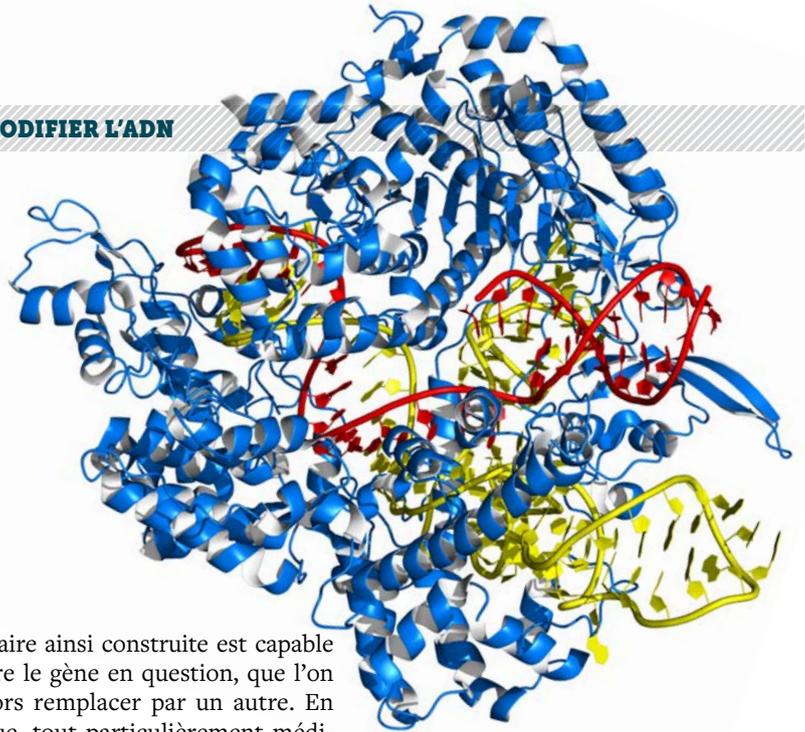
**E**n 2007, on a découvert que les streptocoques et d'autres bactéries ont dans leur arsenal immunitaire une arme particulière: CRISPR. Cet acronyme anglais pour *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, c'est-à-dire « courtes répétitions palindromiques regroupées et régulièrement espacées » (une séquence de nucléotides est dite palindromique quand elle est identique à sa séquence complémentaire lorsqu'on la lit à l'envers), désigne un système qui permet à la bactérie de repérer les gènes parasites insérés dans son génome par un virus bactériophage. La neuvième enzyme associée au système CRISPR, notée Cas9, agit comme une paire de ciseaux moléculaires capable de couper l'ADN et d'en extraire des morceaux indésirables.

En 2012, Emmanuelle Charpentier, alors à l'École médicale de Hanovre, et Jennifer Doudna, de l'université de Berkeley en Californie, ont inventé une méthode pour attacher à Cas9 un « ARN guide », c'est-à-dire une sorte de négatif d'un certain gène, qu'il prend pour cible et sur lequel il va se coller. La petite machine

moléculaire ainsi construite est capable d'extraire le gène en question, que l'on peut alors remplacer par un autre. En génétique, tout particulièrement médicale, un tel outil pouvant agir sur n'importe quel gène apporte une véritable révolution. Des essais d'édition du génome humain avec CRISPR-Cas9 à visée thérapeutique sont d'ores et déjà en cours aux États-Unis et en Chine. Outre d'immenses espoirs thérapeutiques, le système CRISPR-Cas9 permet d'explorer directement le fonctionnement du génome. ■

R. C.

M. Jinek *et al.*, A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity, *Science*, vol. 337, pp. 816-821, 2012



La structure 3D de l'enzyme Cas9 (en bleu) couplée à son ARN guide (en jaune) et son ADN cible (en rouge), établie en 2014, visualise les régions de l'enzyme impliquées dans son activité au sein du complexe CRISPR-Cas9.

## LE GÉNOME NÉANDERTALIEN SE RÉVÈLE



Le génome nucléaire (c'est-à-dire provenant du noyau cellulaire, et non des mitochondries) néandertalien qui a été séquencé en 2013 appartenait à une femme.

**N**ous autres *Homo sapiens* avons longtemps partagé la moitié occidentale de l'Eurasie avec *Homo neanderthalensis*, le premier Européen. Depuis le séquençage de fragments d'ADN mitochondrial extrait d'un os attribué à un Néandertalien en 1997, la question de notre lien de parenté avec ces hommes disparus fait rage.

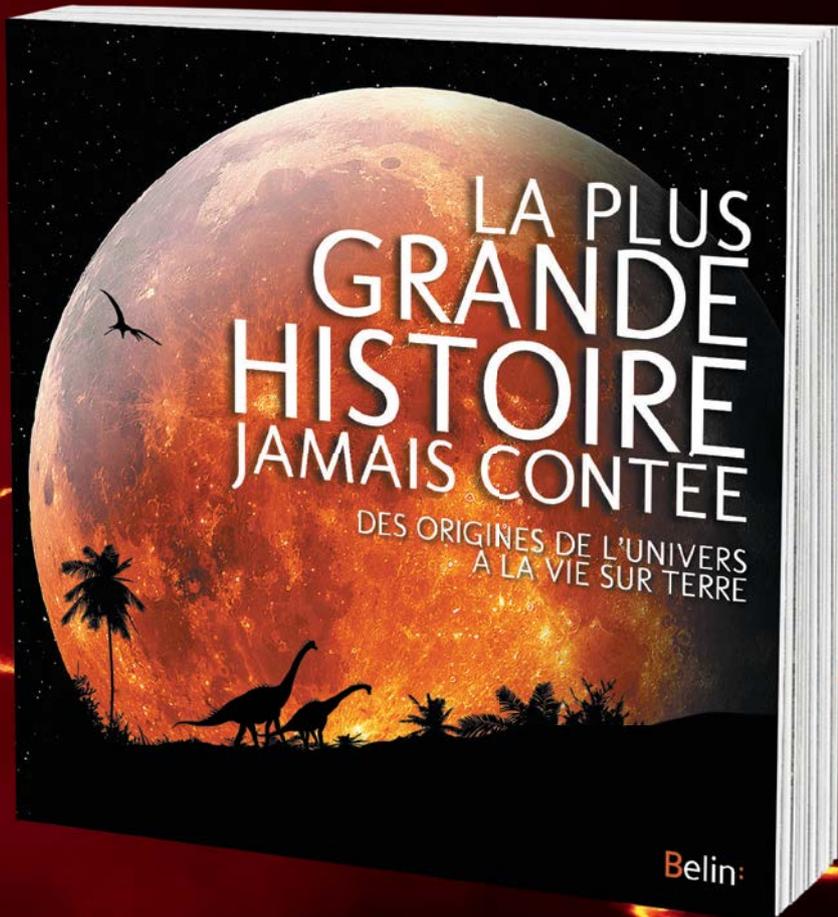
Transmis uniquement par la mère, l'ADN mitochondrial suggérait l'absence de métissage entre les deux groupes. Cette impression s'est nuancée en 2013, quand l'équipe de Svante Pääbo de l'institut Max-Planck, à Leipzig, annonce le séquençage presque complet du génome (nucléaire cette fois) d'un spécimen féminin âgé de plus de 50 000 ans. L'année suivante, une étude comparative du même institut portant sur 1 004 individus actuels confirme ce que d'autres travaux avaient suggéré: il y a bien eu hybridation entre *H. sapiens* et *H. neanderthalensis*.

Les Eurasiens actuels ont entre 1 et 3% de gènes issus des Néandertaliens (la proportion est quasiment nulle en Afrique). Selon le modèle qui domine actuellement parmi les paléoanthropologues, un métissage unique au Moyen-Orient il y a plus de 2500 générations, aurait favorisé l'adaptation de nos ancêtres sortis d'Afrique à l'environnement eurasiatique (mais aurait aussi favorisé des maladies comme le diabète).

Il apparaît aussi qu'une mutation dans le chromosome Y néandertalien rendait les hybrides mâles peu fertiles. L'hybridation était possible mais compliquée... Le débat sur l'identité ou non de nos deux espèces peut donc continuer. ■

R. C.

K. Prüfer *et al.*, The complete genome sequence of a Neanderthal from the Altai Mountains, *Nature*, vol. 505, pp. 43-49, 2013



25 x 25 cm cm - 224 pages + 224 pages cahier photo - 28 €

# Un voyage unique dans l'histoire de l'Univers, de la Terre et du vivant

Disponible en librairie



**Belin:**  
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter sur [www.belin-editeur.com](http://www.belin-editeur.com)

 /EditionsBelin •  @editions\_belin

# 2013 L'humanité modifie le climat

Depuis plusieurs décennies, les climatologues affinent leur analyse de l'influence des émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Le constat est sans équivoque : nous sommes bel et bien responsables d'un réchauffement mondial.

**E**n 2013, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) fait connaître une conclusion scientifique on ne peut plus claire. Son cinquième rapport de synthèse stipule que l'influence des activités humaines est désormais détectable à la fois dans les réchauffements de l'atmosphère et de l'océan, dans l'élévation du niveau marin, dans l'évolution du cycle global de l'eau, dans le recul des neiges et des glaces et dans l'intensification des extrêmes climatiques. Pour le Giec, l'influence de l'homme sur le climat est clairement établie du fait des observations et de la compréhension du fonctionnement du système climatique : l'augmentation des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone et autres gaz accroît l'effet de serre, ce qui explique le réchauffement observé depuis 1950.

Cette conclusion forte a été endossée par tous les gouvernements de la planète, dont les délégués ont approuvé le cinquième rapport du Giec en 2013 à Stockholm. Que l'humanité altère involontairement le climat par ses rejets de gaz à effet de serre est un fait établi scientifiquement. Mais cette réalité dérange, parce qu'elle annonce des risques futurs pour les écosystèmes et pour le développement humain, parce qu'il est difficile de reconnaître ses propres responsabilités, parce

qu'y remédier implique des régulations environnementales perçues comme contraignantes, parce que l'économie de marché se révèle défaillante face au phénomène, parce que la reconnaître risque de dévaluer des actifs financiers (investissements dans le secteur des énergies fossiles, patrimoines immobiliers en zone de submersion côtière...), etc.

## LES TRAVAUX PIONNIERS

Comment la communauté scientifique est-elle parvenue à la conclusion incontournable que le climat est en train d'être modifié par les activités humaines ?

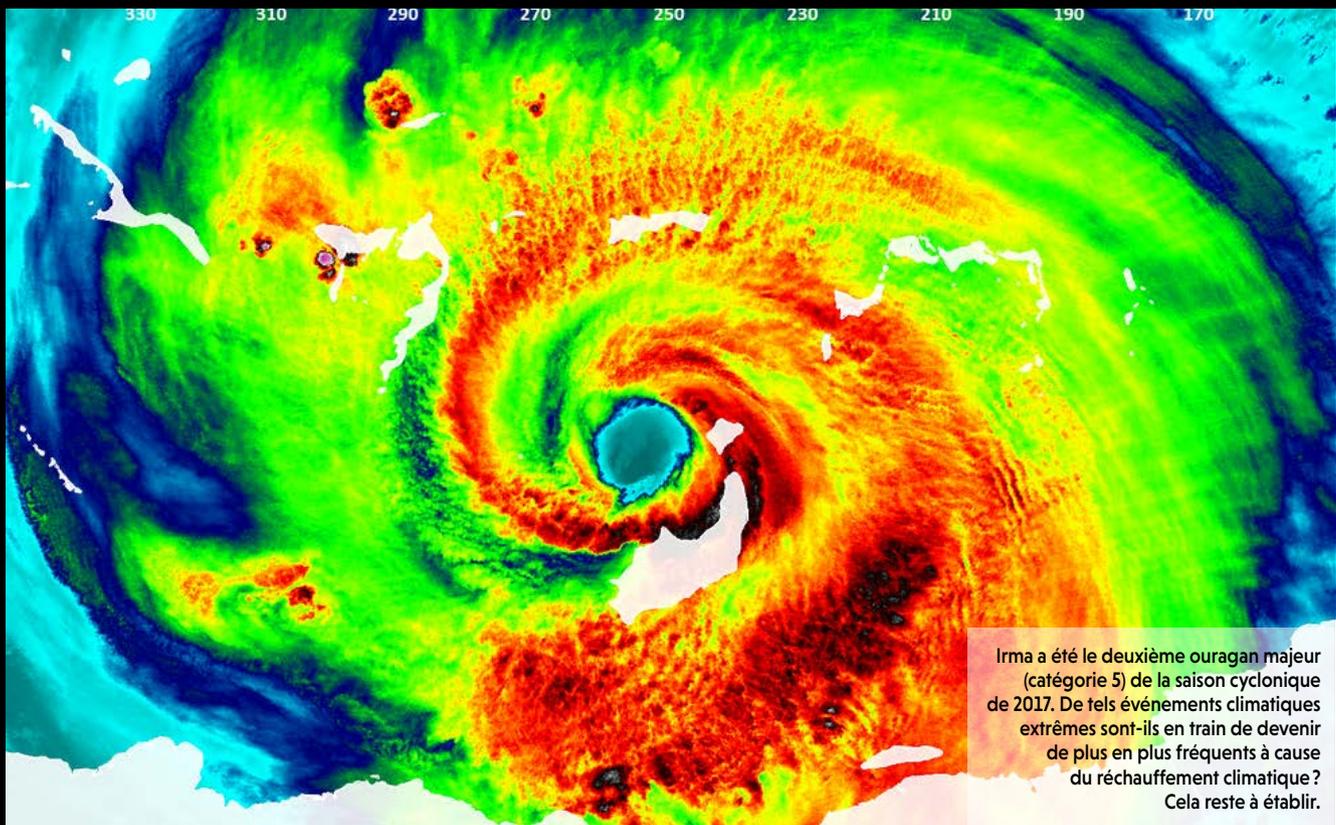
Au XIX<sup>e</sup> siècle, on a commencé à comprendre le transfert du rayonnement dans l'atmosphère, d'où les premiers calculs concernant l'effet des variations de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sur le climat planétaire. En 1896, le Suédois Svante Arrhenius fut le premier à estimer – de façon simpliste – qu'un doublement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> entraînerait un réchauffement planétaire de plusieurs degrés.

Or, dès les années 1930, les données météorologiques ont montré une tendance au réchauffement, en particulier autour de l'Atlantique Nord. Le Britannique Guy Stewart Callendar établit que cette tendance était planétaire, et affirma, sans le démontrer, qu'elle était liée à

## L'AUTEURE



**VALÉRIE MASSON-DELMOTTE**  
directrice de recherche au CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay (CEA/IPSL, université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et université de Paris-Saclay)



Irma a été le deuxième ouragan majeur (catégorie 5) de la saison cyclonique de 2017. De tels événements climatiques extrêmes sont-ils en train de devenir de plus en plus fréquents à cause du réchauffement climatique ? Cela reste à établir.

une augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> d'environ 10% en un siècle. C'est sur cette base que le Canadien Gilbert Plass a publié au cours des années 1950 une analyse approfondie de l'effet de serre atmosphérique. Il y estimait que le doublement de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> par rapport au niveau préindustriel entraînerait, à terme, un réchauffement de 3 à 4 °C.

À la fin des années 1950, l'océanographe américain Roger Revelle et les météorologues suédois Bert Bolin et Erik Eriksson estimèrent que la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> pourrait augmenter de 25% d'ici à l'an 2000. Revelle commença alors à alerter sur l'expérimentation que menait fortuitement l'humanité avec l'atmosphère de sa planète. Son jeune collègue Charles Keeling fut embauché pour évaluer l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère; en 1960, il put s'appuyer sur un réseau d'appareils de mesure précis répartis à travers le monde pour établir de façon robuste l'augmentation mondiale de la concentration de ce gaz. Son enregistrement à Hawaii constitue l'une des séries continues les plus longues du suivi direct de la composition atmosphérique.

Puis, avec l'arrivée des gros calculateurs scientifiques, on est entré dans l'ère des modèles numériques du climat aux États-Unis et en Europe. Au MIT, le Japonais Syukuro Manabe

# 1 °C

**C'EST LA HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE À LA SURFACE DU GLOBE DEPUIS LA FIN DU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE. CELLE-CI EST DUE À L'AUGMENTATION DU TAUX DE DIOXYDE DE CARBONE DANS L'ATMOSPHÈRE, QUI VIENT DE DÉPASSER 400 PARTIES PAR MILLION.**

publia la première simulation, fondée sur une modélisation numérique du climat, des conséquences d'un doublement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> par rapport à l'époque préindustrielle.

Dans les années 1970, de grands progrès ont aussi été accomplis dans la compréhension du cycle global du carbone. Bert Bolin montra ainsi que la combustion des énergies fossiles n'était pas la seule source de CO<sub>2</sub>. La déforestation tropicale s'est révélée alors responsable d'environ 25% des émissions anthropiques.

## **TOUJOURS LA MÊME PLAGE DE « SENSIBILITÉ DU CLIMAT »**

En 1979, pour la première fois, l'Académie américaine des sciences rassembla un groupe d'experts afin d'évaluer les connaissances issues des modèles. Le rapport qui en résulta sous la direction du météorologue Jule Charney mettait en lumière que d'après tous les modèles capables de représenter grossièrement le climat, une augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> entraînerait un réchauffement planétaire; il estima que son doublement provoquerait, à terme, un réchauffement de l'ordre de 3 °C à la surface de la Terre (à ±1,5 °C près).

C'est cette plage pour la «sensibilité du climat» (de 1,5 °C à 4,5 °C) que les experts ayant rédigé le cinquième rapport du Giec ont >



Depuis 1979, la surface de la banquise arctique a diminué de 13% tous les 10 ans. Son extension la plus faible a été atteinte à ce jour en 2012, lorsqu'elle n'a représenté en septembre que 3,39 millions de kilomètres carrés. Nos rejets de gaz à effet de serre ont joué un rôle déterminant dans cette disparition de la banquise arctique, puisque l'on estime qu'une tonne de CO<sub>2</sub> en plus dans l'atmosphère signifie 3 mètres carrés de banquise en moins.

> confirmée. Ils se fondent pour cela sur des modèles du climat beaucoup plus perfectionnés et analysent le réchauffement récent et les changements climatiques du passé ancien.

Ainsi, ce rapport du Giec est le produit de la longue maturation scientifique internationale entamée après le rapport Charney. À la fin des années 1970, en effet, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a réuni la première conférence mondiale de climatologues. Le Programme mondial de recherche sur le climat fut alors lancé sous l'égide du Conseil international des unions scientifiques (ICSU), de l'OMM et de la commission océanographique de l'Unesco. Il joue depuis un rôle essentiel dans l'identification des priorités scientifiques et dans la coordination internationale, en particulier autour de la modélisation du climat.

Au début des années 1980, l'Américain Veerabhadran Ramanathan évalua le forçage radiatif, c'est-à-dire la perturbation du bilan énergétique de la Terre due aux différents constituants de l'atmosphère. Il montra que les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> ne sont pas le seul facteur contribuant au réchauffement global et identifia une augmentation importante de l'effet de serre due aux émissions d'autres gaz à effet de serre au cours des activités agricoles, tels le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (NO<sub>2</sub>).

Peu après, grâce aux travaux des Français Claude Lorius, Jean Jouzel et de leurs collègues, l'air piégé dans les glaces de Vostok, en Antarctique, révéla les variations naturelles passées de la concentration de ces gaz à effet de serre. Aujourd'hui, le forage Epica Dôme C a étendu ces connaissances aux 800000 dernières années. Ces données démontrent que la température antarctique, le climat mondial et la concentration atmosphérique de gaz à effet de

serre sont interdépendants. Le registre climatique contenu dans les carottes de glace témoigne de la rupture que constitue la période industrielle par rapport aux variations naturelles de la composition atmosphérique. Il démontre que la machine climatique de la planète subit aujourd'hui une perturbation sans précédent.

Au début des années 1980, les mesures de la température de l'air à la surface du globe ont été compilées par le Britannique Phil Jones et l'Américain James Hansen. Ces données montraient que le réchauffement, à cette époque, était sans précédent depuis un siècle.

## LA CRÉATION DU GIEC

En 1988, l'OMM et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) créèrent le Giec. Son mandat porte explicitement sur la compréhension du système climatique et de ses évolutions et sur l'évaluation de l'influence humaine sur le climat. Le Giec n'a pas été créé pour mener des recherches nouvelles, mais pour évaluer l'état des connaissances vis-à-vis du changement climatique. Lors de chacune des versions successives de ses rapports, des milliers de relecteurs font des commentaires, qui contribuent de façon essentielle au caractère exhaustif et rigoureux de l'évaluation finale.

En 1990, les auteurs du premier rapport du Giec constataient le réchauffement et l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre due aux activités humaines. Ils indiquaient qu'une décennie serait nécessaire avant de pouvoir discerner quelle part du réchauffement est due à cette augmentation de l'effet de serre, constatant simplement : «L'importance du réchauffement observé correspond grossièrement aux prédictions des modèles climatiques, mais elle est aussi du même ordre

## BIBLIOGRAPHIE

**Cinquième rapport de synthèse du Giec**, téléchargeable sur : [ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](http://ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)

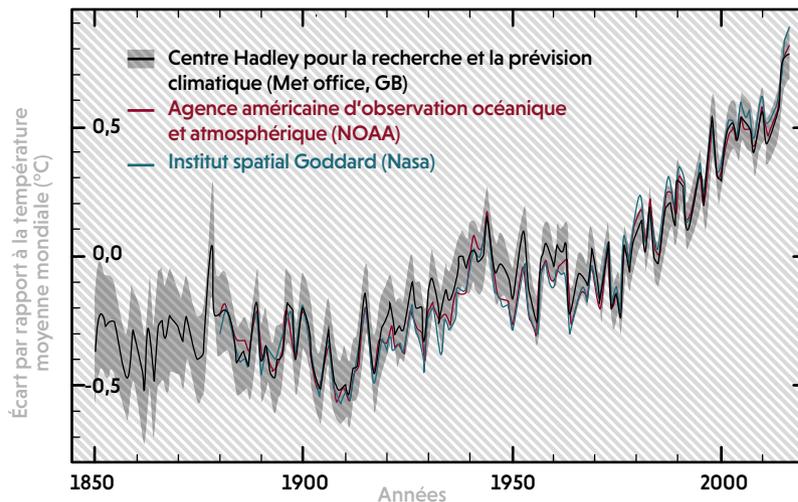
S. R. Weart, **The idea of anthropogenic global climate change in the 20<sup>th</sup> century**, *WIREs Climate Change*, vol. 1(1), pp. 67-81, 2010.

**Carbon dioxide and climate : A scientific assessment, 1979**, rapport téléchargeable sur : [www.ecd.bnl.gov/steve/charney\\_report1979.pdf](http://www.ecd.bnl.gov/steve/charney_report1979.pdf)

que les variations naturelles du climat.» Le rapport du Giec incitait l'ONU à mettre en place la Convention-cadre sur les changements climatiques, qui sera ratifiée par 154 États en 1992, au sommet de Rio de Janeiro.

En 1995, le constat scientifique s'est affiné: pour la première fois, les auteurs du deuxième rapport du Giec concluent qu'un faisceau d'éléments suggère une influence humaine sur le climat. Le troisième rapport, en 2001, le confirme: «Des preuves plus récentes et plus concluantes permettent de dire que la majeure partie du réchauffement observé au cours des cinquante dernières années est due aux activités humaines.»

En 2007, sur la base des nouveaux résultats, le quatrième rapport affirme que l'essentiel du réchauffement observé depuis le milieu du xx<sup>e</sup> siècle est, avec un niveau de confiance de 90%, lié aux activités humaines. Et en 2013, le cinquième rapport conclut avec un niveau de confiance encore plus élevé (95%). Il décrit de façon plus quantitative l'influence humaine, qui domine à l'échelle planétaire non seulement les réchauffements atmosphérique et océanique, mais aussi la montée du niveau des mers. On décèle désormais cette influence également au niveau régional (tendance des températures, évolution des glaciers, vagues de chaleur, intensité des pluies torrentielles...).



Depuis 2013, aucun résultat scientifique n'a contredit ces conclusions. Les climatologues continuent patiemment leur travail pour mieux anticiper les conséquences du réchauffement climatique. Ils se concentrent en particulier sur les épisodes extrêmes singuliers que peuvent constituer certains ouragans de forte intensité, pluies torrentielles ou vagues de chaleur. Ces nouvelles estimations contribueront au sixième rapport du Giec, prévu pour 2021. ■

Ci-dessus, l'évolution de la température moyenne annuelle à la surface de la Terre par rapport à la période de référence 1961-1990 traduit la tendance mondiale au réchauffement. Elle est calculée à partir des mesures de température de l'air au-dessus des continents et de la température de surface des océans. Trois jeux de données sont comparés. La plage d'incertitude des données britanniques est en gris.

# TEDx Saclay

présente

30  
NOVEMBRE

@CENTRALESUPÉLEC

tedxsaclay.com

## AU SERVICE DU VIVANT

CentraleSupélec

PARIS  
SACLAY  
Centre universitaire d'innovation

DATA  
CAMPUS  
PARIS-SACLAY

NOVOTEL  
HOTELS & RESORTS

POUR LA  
SCIENCE

Esprit  
LE DÉPARTIMENT

P  
P  
R

AirLiquide

BANQUE POPULAIRE VAL DE FRANCE  
AJOUTER LES FORCES  
MULTIPLIER LES CHANCES

2015

# L'astronomie gravitationnelle est née

La coalescence de deux astres compacts crée des vibrations dans la trame de l'espace-temps. Longtemps attendue, la détection de ces ondes gravitationnelles a inauguré une astronomie nouvelle. L'exploit vient d'être récompensé par le prix Nobel de physique.

**C**e lundi 14 septembre 2015, les détecteurs de *Ligo*, aux États-Unis, enregistrent un signal, noté GW150914, de moins de une seconde. Cinq mois plus tard, les physiciens de cet observatoire particulier révéleront qu'il traduisait le passage de l'onde gravitationnelle créée par la fusion de deux trous noirs lointains. Le 26 décembre, *Ligo* détecte un nouvel événement comparable. Un troisième est enregistré le 4 janvier 2017. Et le 27 septembre dernier, *Ligo* et *Virgo*, le détecteur européen situé près de Pise et devenu pleinement opérationnel entre-temps, ont annoncé une quatrième mesure du même type.

*Ligo* est l'acronyme pour « Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie ».

laser». Il est composé de deux interféromètres, l'un en Louisiane, l'autre dans l'État de Washington. Un puissant faisceau laser y est divisé en deux pinces lumineuses perpendiculaires qui, après s'être réfléchis sur des miroirs distants de 4 kilomètres, reviennent se combiner sur un détecteur de photons. Leur sensibilité à toute variation de la distance parcourue par les faisceaux est si grande qu'un déplacement d'un centième de la taille d'un proton est détectable.

Depuis que les interféromètres de *Ligo* ont atteint la sensibilité requise pour détecter les signaux gravitationnels, et que celui de *Virgo* les a rejoints, une nouvelle page de l'astronomie s'est ouverte, dont on attend une moisson de nouveaux résultats.

Un trou noir est de la gravitation à l'état pur. Une solution *a priori* déconcertante des équations d'Einstein (les équations de la relativité générale) nous avait prédit leur existence avant leur découverte. Leur surface est immatérielle: on ne s'y pose pas, on la traverse, sans possibilité de retour. D'où son nom d'«horizon», et celui de «trou noir» donné à l'astre, puisqu'aucune lumière ne peut en échapper.

Les trous noirs sont omniprésents dans l'Univers. Certains sont très massifs, tel celui qui se situe au centre de la Voie lactée, dont on infère les propriétés en observant le ballet d'une douzaine d'étoiles en orbite autour de lui. Par ailleurs, l'existence dans notre galaxie d'une vingtaine de trous noirs membres de systèmes doubles est prouvée par leurs masses supérieures à celle que peut atteindre une étoile compacte. Leurs masses valent une dizaine de fois celle du Soleil et leurs horizons n'ont que quelques dizaines de kilomètres de rayon. On les détecte grâce au rayonnement X de la matière en provenance de l'autre étoile, chauffée au cours de sa chute vers l'horizon du trou noir, au-delà duquel elle disparaît à jamais.

L'existence des ondes gravitationnelles avait été établie indirectement, grâce à l'observation de quatre «pulsars binaires» – des systèmes doubles formés d'objets compacts, dont un au moins est une étoile à neutrons munie d'un gyrophare radio. L'analyse fine des temps d'arrivée sur Terre des impulsions montre un rétrécissement de leurs orbites relatives (quelques millimètres par révolution pour une orbite de plusieurs centaines de milliers de kilomètres), imputé à la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles.

Ces mesures sont en tout point conformes à la prédiction faite par Einstein en 1918, mais qui n'est apparue comme solide que beaucoup plus tard. Il a en effet fallu comprendre comment les ondes gravitationnelles peuvent transporter au loin de l'énergie et de l'information sur leur source.

Cependant, avant le 14 septembre 2015, on n'avait jamais observé de systèmes à deux trous

## LES AUTEURS



**NATHALIE DERUELLE**  
directrice de recherche  
au CNRS, laboratoire  
APC (AstroParticule  
et Cosmologie),  
université Paris-Diderot



**JEAN-PIERRE LASOTA**  
directeur de recherche  
émérite à l'IAP (Institut  
d'astrophysique de  
Paris) et professeur  
au Centre d'astronomie  
Nicolas Copernic,  
à Varsovie (Pologne)

noirs et il manquait la détection directe d'une onde gravitationnelle.

Chacun des quatre signaux gravitationnels détectés jusqu'ici a été émis après que deux trous noirs, en spiralant l'un vers l'autre, ont fini par approcher la vitesse de la lumière, puis ont fusionné en une fraction de seconde en un seul trou noir, laissant derrière eux quelques brefs soubresauts de l'espace-temps.

Le défi posé par leur détection a d'abord été expérimental. Sous l'impulsion d'Alain Brillet (Médaille d'or du CNRS en 2017), la France y a apporté une contribution importante: le revêtement des miroirs, qui réfléchissent 99,9999% de la lumière, a été élaboré à Lyon, au Laboratoire des matériaux avancés fondé par Jean-Marie Mackowski. Le défi a aussi été théorique, car il fallait chercher des signaux extraordinairement faibles dans la botte de foin du bruit expérimental. Cela impliquait de les prédire avec une extrême précision. L'école menée par Thibault Damour (aussi Médaille d'or du CNRS en 2017) s'est particulièrement illustrée dans ce domaine.

Le défi a été relevé et, à chaque détection, la comparaison de centaines de milliers de formes théoriques d'ondes avec les signaux recueillis a permis d'extraire les caractéristiques des

# Les ondes détectées à ce jour correspondent à la chute de deux trous noirs l'un sur l'autre

## BIBLIOGRAPHIE

S. Bailly, **La détection des ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers**, *Pour la Science*, n° 462, pp. 26-37, 2016.

N. Deruelle, **De Pythagore à Einstein, tout est nombre**, Belin, 2015.

J.-P. Lasota, **La science des trous noirs**, Odile Jacob, 2010.

systèmes émetteurs. Par exemple, les deux trous noirs initiaux liés au signal GW150914 pesaient 36 et 29 masses solaires, tandis que le trou noir résultant de leur fusion est de 62 masses solaires.

L'astronomie des ondes gravitationnelles est devenue une réalité. Elle nous a déjà appris que la surface des trous noirs est bien un horizon immatériel; bientôt, on devrait enregistrer des fusions d'étoiles à neutrons, qui s'accompagnent *a priori* de flashes électromagnétiques. Gageons que d'ici quelques années, avec la mise en service d'autres détecteurs en projet au Japon et en Inde, et plus tard la mise en orbite de l'interféromètre spatial européen *eLisa*, l'astronomie gravitationnelle fera partie du quotidien des chercheurs. ■

2016

# Apprentissage profond

## pour intelligences artificielles

Après des décennies de trop lents progrès, les recherches en intelligence artificielle ont franchi un pas décisif, qui explique l'effervescence actuelle autour des réseaux neuronaux profonds.

**E**n 2016, un ordinateur a battu **Lee Sedol, champion professionnel du jeu de go, grâce à un logiciel conçu par la société Google DeepMind.** Cet exploit remarquable est le fruit de grands et récents progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Mais est-on pour autant proche de l'intelligence humaine? Non, car le logiciel de DeepMind ne sait rien faire d'autre que jouer au go. Comment en est-on arrivé là et comment envisage-t-on de progresser?

L'intelligence se démontre à travers une compétence dans des domaines particuliers, ce qui nécessite de bonnes connaissances dans les domaines en question. Pour rendre les ordinateurs aussi intelligents que les humains, il faut donc faire en sorte que les ordinateurs aient au moins autant de connaissances qu'un humain ordinaire. Plusieurs décennies durant, l'approche dominante dans les recherches sur l'intelligence artificielle a ainsi consisté à fournir directement à la machine des connaissances.

Il s'agissait alors de formaliser nos connaissances, c'est-à-dire de les mettre sous une forme claire et compréhensible par l'ordinateur. Mais beaucoup de nos connaissances sont intuitives et ne nous sont pas consciemment accessibles.

L'intuition est ce qui permet au joueur de go de bien choisir son prochain coup, au bon conducteur d'éviter un accident, au médecin d'allier ses connaissances livresques à la psychologie du patient; et surtout, cela implique presque toutes nos capacités perceptives, que l'on ne sait pas décrire précisément, mais qui sont essentielles à notre compréhension du monde.

Pour l'intelligence artificielle, la solution qui s'est révélée fonctionner à merveille est que l'ordinateur acquière lui-même ses connaissances, en apprenant à partir d'exemples. Le domaine scientifique relatif à cet «apprentissage automatique» a connu plusieurs vagues de progrès, et l'on y a exploré de nombreux algorithmes et formalismes mathématiques. Une bonne partie d'entre eux sont regroupés derrière l'idée des «réseaux de neurones», qui consiste à s'inspirer du cerveau pour effectuer des formes de calcul différentes de celles de l'ordinateur classique.

Dans cette approche, des neurones artificiels (des éléments logiciels ou matériels) reçoivent des signaux provenant d'autres neurones, font un calcul relativement simple pour combiner ces signaux et renvoient le résultat à d'autres neurones (*voir l'encadré page 102*). Les réseaux neuronaux artificiels sont souvent organisés en couches successives, les résultats calculés par une couche étant envoyés aux couches suivantes.

## L'AUTEUR



**YOSHUA BENGIO**  
professeur  
au département  
d'informatique  
et recherche  
opérationnelle  
de l'université  
de Montréal



Fondé sur de l'apprentissage profond, le programme AlphaGo de la société Google DeepMind a permis à un ordinateur (plutôt qu'un robot) de battre au jeu de go un champion mondial, le Coréen Lee Sedol.

L'apprentissage se fait par une modification du calcul effectué par chaque neurone, selon un algorithme qui ajuste les « poids » des connexions entre neurones (des coefficients dont dépend le calcul fait par chaque neurone).

Au début des années 2000, les recherches sur les réseaux neuronaux n'étaient plus en vogue, faute de résultats suffisamment probants. Or c'est précisément à ce moment qu'une percée a eu lieu, hors de la lumière des projecteurs médiatiques qui inondent aujourd'hui le domaine. Pour la première fois, en 2006, trois équipes, autour de Geoffrey Hinton, à l'université de Toronto, de moi-même, à l'université de Montréal, et de Yann LeCun, à l'université de New York, ont réussi, avec un nouvel algorithme, à entraîner des réseaux neuronaux « profonds » – composés de plus d'une ou deux couches entre l'entrée et la sortie du réseau. Nous avons l'intuition, depuis longtemps, qu'un réseau profond pourrait être plus puissant que ceux explorés jusque-là. Ce qui a été confirmé dans les années suivantes.

Les tentatives précédentes pour entraîner des réseaux profonds n'avaient pas été fructueuses, sans doute à cause d'une difficulté mathématique que l'on ne comprend pas encore totalement. C'est seulement en 2011 que notre équipe a découvert que certaines formes de non-linéarité dans le calcul effectué par les

neurones artificiels facilitaient beaucoup l'entraînement de réseaux profonds. Depuis, les succès et les progrès se sont accélérés, d'abord pour la reconnaissance de la parole – de nos jours, presque tous les systèmes opérationnels de ce type utilisent l'apprentissage profond –, puis pour la vision par ordinateur.

Ces progrès ont été possibles non seulement grâce à de nouveaux algorithmes et architectures de réseaux neuronaux, mais aussi grâce à la puissance de calcul accrue des puces graphiques (les GPU) et à la disponibilité de grandes bases de données étiquetées (qui contiennent des millions d'exemples servant à l'entraînement, pour lesquels on indique à l'ordinateur la bonne réponse à produire, par exemple la catégorie à laquelle appartient l'objet principal figurant dans une image).

L'ordinateur fait de l'apprentissage supervisé: on le nourrit avec des exemples constitués chacun d'un couple (entrée, sortie désirée). Souvent, la sortie désirée doit être fournie par un humain. Ce travail d'étiquetage, fastidieux et coûteux, est aujourd'hui au cœur de la plupart des systèmes industriels fondés sur l'apprentissage profond.

Alors que les réseaux neuronaux des années 1990 étaient essentiellement limités à la reconnaissance des formes, appliquée à une >

## BIBLIOGRAPHIE

Y. LeCun et al., **Deep learning**, *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, 2015.

D. Bahdanau et al., **Neural machine translation by jointly learning to align and translate**, *ICLR Conference*, 2015.

X. Glorot et al., **Deep sparse rectifier neural networks**, *AISTATS Proceedings, PMLR*, pp. 315-323, 2011.

G. E. Hinton et al., **A fast learning algorithm for deep belief nets**, *Neural Computation*, vol. 18(7), pp. 1527-1554, 2006.

Y. Bengio et al., **Greedy layer-wise training of deep networks**, *NIPS Proceedings*, pp. 153-160, 2006.

> entrée représentée par un vecteur de taille fixe, les réseaux neuronaux d'aujourd'hui peuvent traiter des entrées dont la taille est variable – listes, ensembles, arbres, graphes, etc.

Par ailleurs, certains algorithmes et architectures confèrent aux réseaux neuronaux un mécanisme dit d'attention diffuse, qui permet à chaque instant de focaliser le calcul sur un élément (ou un petit nombre d'éléments) de l'entrée qui est plus pertinent. Ces éléments peuvent être des positions dans une image, auquel cas on parle d'attention visuelle, des parties d'un graphe ou de tout autre ensemble d'éléments que l'ordinateur doit traiter.

Le mécanisme d'attention diffuse facilite l'entraînement du réseau neuronal et a été l'élément principal qui nous a permis d'obtenir une percée en traduction automatique, à partir de 2014-2015. On retrouve maintenant un tel système dans Google Translate, avec une qualité de traduction de loin supérieure à ce qui existait auparavant.

L'attention diffuse intervient aussi dans l'exploration moderne de mécanismes appris de raisonnement. Les chercheurs en apprentissage profond considèrent aujourd'hui le raisonnement comme une façon de combiner séquentiellement plusieurs éléments (des faits) afin de parvenir à une conclusion (un fait inféré ou déduit). Le mécanisme de raisonnement (par exemple, une règle d'inférence du type: « Si A et B, alors C ») lui-même n'est pas fixé d'avance, mais est appris par la machine, de façon à pouvoir résoudre les problèmes qui lui sont soumis et dont la solution exige un raisonnement.

## APPRENTISSAGE NON SUPERVISÉ

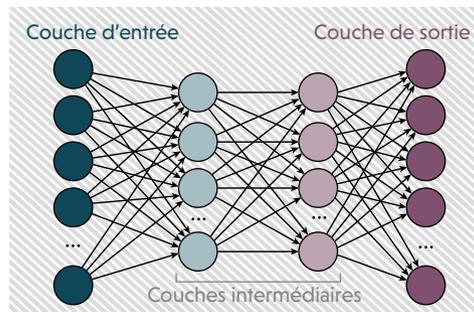
Pour s'approcher de l'intelligence humaine, il faudra découvrir des mécanismes d'apprentissage grâce auxquels la machine pourra réellement comprendre les rouages profonds de son environnement. Or il est impossible de compter sur les humains pour fournir une interprétation sémantique de toutes les données utilisées pour entraîner la machine. C'est pourquoi les chercheurs s'éloignent du cadre classique de l'apprentissage supervisé et se mettent à combiner apprentissage non supervisé et apprentissage « par renforcement ».

Dans l'apprentissage profond non supervisé, on fournit à la machine un ensemble de données ou d'exemples sans lui spécifier le résultat qu'elle doit assigner à chacun d'eux: l'algorithme doit permettre au système de classer de lui-même ces données (par exemple, à partir de nombreuses images de véhicules présentées lors de l'apprentissage, la machine pourra déterminer, sur une nouvelle image, si l'objet représenté est un véhicule ou quelque chose d'une autre nature).

Les chercheurs s'intéressent particulièrement à l'apprentissage profond non supervisé et « génératif », où l'ordinateur peut créer

## RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

**L**es réseaux de neurones artificiels sont des systèmes, étudiés dès la fin des années 1940, qui s'inspirent des propriétés des neurones biologiques et de leurs connexions.



aléatoirement de nouvelles données intéressantes, par exemple synthétiser de nouvelles images, de nouveaux sons, de nouvelles phrases. La tâche d'un tel ordinateur-artiste n'est pas aisée: il ne suffit pas de produire des pixels au hasard, ces pixels doivent être organisés d'une façon qui soit plausible, qui puisse, par exemple, correspondre à une image naturelle.

Quant à la démarche dite d'apprentissage par renforcement, elle consiste à apprendre à produire une séquence d'actions qui maximisent un ou plusieurs objectifs ou récompenses futures. C'est ainsi que, par exemple, l'enfant apprend une physique intuitive sans l'aide de ses parents, en jouant, en observant et en interagissant avec son environnement.

L'apprentissage non supervisé et par renforcement permettra peut-être à une machine de bien se représenter le monde qui l'entoure (c'est-à-dire de le comprendre) et ainsi de mieux planifier ses actions. Il est difficile d'évaluer le chemin qui reste à parcourir pour atteindre un tel niveau d'intelligence artificielle. Mais ce qui est sûr, c'est que de nombreuses applications utiles seront possibles dès demain grâce aux techniques d'apprentissage profond que nous connaissons déjà (d'où l'engouement de nombreuses entreprises pour ce domaine). Et que ces potentialités seront plus énormes encore quand les recherches fondamentales déboucheront sur de l'intelligence artificielle comparable à celle d'un humain. ■

Un neurone artificiel peut être un composant logiciel ou un composant matériel. À partir des signaux numériques qu'il reçoit d'autres neurones, il calcule, selon des règles simples, un résultat qu'il transmet aux neurones suivants. Ce signal est lui-même pondéré par la « force » – on dit aussi le « poids » – de la connexion par laquelle il passe.

Typiquement, un réseau neuronal est constitué d'une couche de neurones d'entrée, d'une couche de sortie et d'une ou plusieurs couches intermédiaires ou « cachées » (jusqu'à plusieurs centaines dans les réseaux profonds). Les neurones d'entrée recueillent les données (par exemple les valeurs des pixels d'une image), ceux de sortie transmettent un résultat (qui code par exemple le type d'objet que le réseau a reconnu dans l'image).

Dans le processus d'apprentissage, où un grand nombre d'exemples sont présentés au réseau, les poids des connexions sont modifiés peu à peu selon un algorithme approprié, afin d'obtenir des performances optimales de reconnaissance.



# Quel âge a vraiment Pour la Science?

Quarante ans pour un Terrien. Mais 21 ans pour un Martien.  
Il a fallu environ 14 600 jours pour produire les 481 numéros  
de *Pour la Science* ; combien de temps vous faudra-t-il  
pour les lire ?



Le premier numéro  
de *Pour la Science*  
est paru en  
novembre 1977.  
Il y a exactement  
quarante ans.

**P**our fêter un anniversaire, il faut définir un point de départ, puis un événement régulier et récurrent pour déterminer une durée en comptant le nombre d'occurrences. Ainsi,

le premier numéro de *Pour la Science* étant paru en novembre 1977, la revue aura donc 40 ans révolus à la fin de cette année, en prenant comme référence la révolution de la Terre autour du Soleil. Mais ce choix est bien sûr arbitraire: compter le nombre de levers du Soleil confère à *Pour la Science* un âge de 14610 jours, ou 495 lunaisons si l'on se réfère au nombre de nouvelles lunes depuis la création du magazine. Notons que cette dernière valeur est à peu près égale au nombre de numéros parus, ce qui est normal pour une revue dont la périodicité est voisine de la durée moyenne qui sépare deux nouvelles lunes (29,5 jours environ).

Une autre façon d'annoncer son âge, qui amuse beaucoup les enfants, consiste à le mesurer en référence à la période de révolution d'une autre planète. Ainsi, 40 années terrestres correspondent à environ 166 années mercuriennes, 65 années vénusiennes ou 21 années martiennes, pour ne parler que des planètes telluriques du Système solaire.

Ce jeu sur l'âge nous rappelle qu'une histoire, la vôtre ou celle de votre revue préférée, est une succession d'événements séparés par des durées perçues et mesurées en les rapportant à un mouvement périodique, astronomique (Soleil ou Lune), mécanique (clepsydre, horloge ou montre) ou quantique (horloge atomique). Autrement dit, une histoire est un empilement de durées et le choix d'une origine, votre date de naissance ou celle de la parution du premier numéro de votre revue, permet de définir un « temps »: nous sommes en l'an 40 après *Pour la Science*.

## ET LE TEMPS DEVIENT RELATIF

La question du temps et de la mesure des durées a pris un relief particulier avec les travaux d'Albert Einstein. La nouvelle théorie de l'espace et du temps qu'il publia en 1905 est fondée sur deux postulats en rupture profonde avec la physique de son époque: «... pour tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables, ce sont également les mêmes lois de l'optique et de l'électrodynamique qui sont valables. Nous voulons élever cette conjecture [dont le contenu sera appelé dans ce qui suit «principe de relativité»] au rang d'une hypothèse et introduire en outre la supposition, qui n'est qu'en apparence incompatible avec ce principe, que la lumière se propage toujours dans le vide à une certaine vitesse  $c$  indépendante de l'état de mouvement de la source lumineuse.»

Si le premier postulat d'Einstein ne fait qu'étendre le principe de relativité de Galilée à toute la physique alors connue, le second est

véritablement révolutionnaire. Jusqu'alors, espace et temps formaient le cadre universel dans lequel se déroulent les événements, et la vitesse, quotient d'une distance par une durée, est une notion qui découle de ce cadre. Poser que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de la source revient à lier le temps et l'espace pour s'adapter à cette vitesse: ils deviennent «relatifs» au système de référence de l'observateur. Le second postulat d'Einstein implique alors que la durée d'un phénomène n'est plus identique pour tous les observateurs et Einstein montre qu'elle dépend de leurs vitesses relatives. Il définit aussi une durée «propre», celle qui sépare deux événements se produisant au même endroit.

En 1908, Hermann Minkowski proposa de fusionner l'espace à trois dimensions et le temps unidimensionnel pour former une nouvelle entité physique, l'espace-temps à quatre dimensions, ensemble de tous les événements. Une histoire, succession d'événements se déroulant en différents lieux, est alors une ligne de

## LES AUTEURS



**ROLAND LEHOUCQ**  
astrophysicien  
au CEA, à Saclay



**SÉBASTIEN STEYER**  
paléontologue  
au CNRS-MNHN

# À bord d'un vaisseau intersidéral, la durée du voyage est plus courte que pour le Terrien

l'espace-temps dont chaque portion a une durée qui est propre à l'observateur qui suit cette ligne. Le temps, construit par accumulation de durées propres, est donc une grandeur purement personnelle, liée à chaque observateur, et qui n'a *a priori* rien à voir avec le temps d'un autre observateur. Cela interdit de définir une grandeur universelle nommée « temps » construite par l'addition de durées successives sur lesquelles tous les observateurs s'accorderaient.

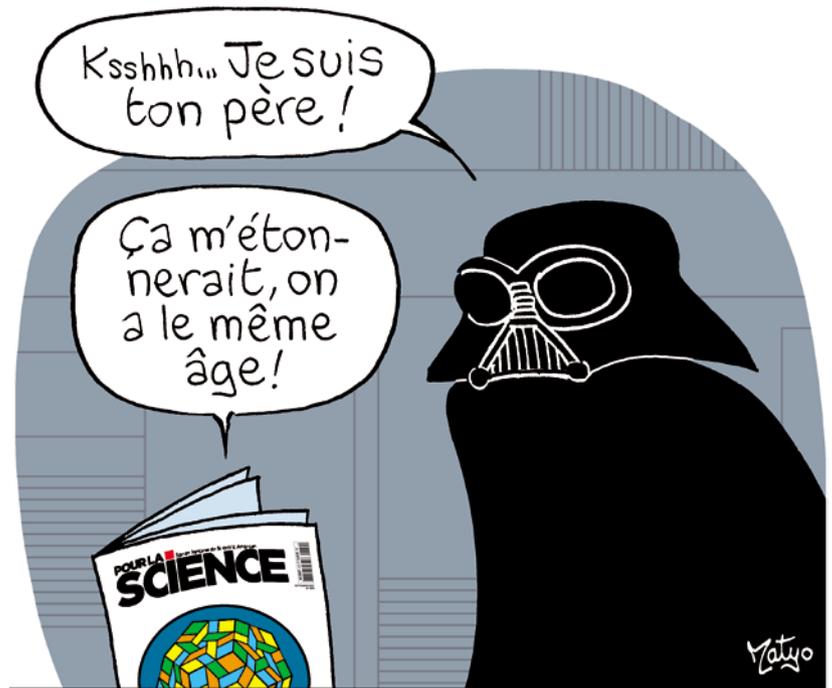
En 1971, les physiciens américains Joseph Hafele et Richard Keating réalisèrent une expérience pour tester cette prédiction étonnante. Des horloges atomiques extrêmement précises furent embarquées dans deux avions partis pour faire le tour du monde. À leur retour, les durées des voyages mesurés par ces horloges furent comparées avec celle mesurée par une horloge identique, restée au sol et avec laquelle elles avaient été préalablement synchronisées. Les horloges de l'avion accusaient, selon la direction de leur vol vers l'est ou vers l'ouest, >

> respectivement un retard ou une avance sur celle restée au sol en accord avec la théorie d'Einstein. Les différences, de l'ordre d'une centaine de milliardièmes de seconde, sont toutefois si infimes que, pour la vie courante, il est possible de rassembler nos temps propres pour fabriquer un temps « universel ». Ouf, les apparences sont sauvées et, à une infime fraction de seconde près, *Pour la Science* a bien 40 ans pour tout le monde ! Mais il existe des situations bien différentes.

## VOYAGE SPATIAL

Puisque cette année marque aussi les 40 ans de la célèbre saga *Star Wars*, faisons un peu de science-fiction. Imaginons que le jour de la publication du numéro 1 de *Pour la Science*, un voyageur embarque dans un vaisseau interstellaire capable d'atteindre une vitesse proche de celle de la lumière avec la promesse de revenir quand 40 années se seront écoulées sur Terre. Quelle sera la durée propre de son voyage ? Pour mener ce calcul, il faut connaître le plan de vol du vaisseau dont nous allons supposer qu'il fait demi-tour à mi-parcours, avec une accélération ou une décélération propres – mesurées à bord – constantes. Ainsi, un voyage à une accélération constante de  $1g$  conduit à une durée propre du voyage de 11,74 ans. À  $2g$ , le voyage dure 7,21 ans, etc. On constate que la durée propre du voyage est toujours inférieure à la durée mesurée par un observateur terrestre. Bonne nouvelle, car cela implique qu'avec une accélération propre constante, un voyageur peut franchir des distances interstellaires en une durée inférieure à celle d'une vie humaine.

Pour éviter de vous ennuyer durant le voyage, vous avez maintenu votre abonnement à *Pour la Science*. Chaque numéro vous est envoyé par ondes radio, à la vitesse de la lumière donc. Comme les durées terrestres et les durées propres diffèrent, la périodicité mensuelle terrestre ne sera pas respectée à bord. Ainsi, au cours du voyage aller, vous recevrez votre magazine avec des intervalles de plus en plus grands. Ils commenceront à diminuer au début de la phase de décélération. Avec une accélération/décélération propre de  $1g$ , environ 20,6 mois sépareront deux numéros successifs autour du moment où la vitesse maximale est atteinte. Finalement, vous ne recevrez que 22 numéros lors de l'aller – dont la durée propre est de 5,87 ans – car la lumière porteuse d'information doit vous rattraper. Il en va tout autrement au retour, car alors votre vaisseau va à la rencontre des messages terrestres. Les intervalles de réception des numéros de *Pour la Science* se réduiront de plus en plus jusqu'à atteindre un minimum au milieu du voyage retour, avec un intervalle de réception minimal de 1,5 jour : il faudra lire vite ! Durant les 5,87 années propres du voyage retour, vous aurez à lire 458 numéros...



## FREE-RUNNING

**Dans certains cas, l'horloge biologique ne peut pas se synchroniser sur des signaux réguliers exogènes tels que la lumière du jour. C'est le cas de la plupart des personnes aveugles. Pour les autres aveugles, certains photorécepteurs sont encore fonctionnels et connectés à l'hypothalamus. Cet effet de free-running a été reproduit artificiellement par le spéléologue Michel Siffre qui, dans les années 1960, a passé plusieurs mois dans une grotte sans repères de temps. Son organisme s'est alors calé sur un cycle de 24 h 30.**

On le voit bien, la notion d'anniversaire – et donc de durée – varie en fonction de l'observateur humain. Qu'en est-il chez les autres espèces ? Elles perçoivent probablement les durées de façon différente : chacune à son échelle, notamment en fonction de la durée de vie moyenne, très différente d'une espèce à l'autre. Ainsi, l'éphémère, insecte volant dont la durée de vie au stade adulte est de l'ordre de 24 heures, perçoit les durées sans doute d'une autre façon que le pin Bristlecone (*Pinus longaeva*), dont certains représentants dans les montagnes Rocheuses sont âgés de près de 5000 ans, ou du corail noir de Hawaï (du genre *Leiopathes*), dont l'individu le plus vieux connu est âgé de 4265 ans.

On pourrait penser que le cycle solaire étant le même pour toutes les espèces, la perception du cycle jour/nuit serait identique pour tous, mais c'est sans compter sur les horloges biologiques, qui définissent un rythme propre à chacun. Celles-ci confèrent aux organismes une notion de temps subjectif mais autonome, et on parle, par extension, d'horloges circadiennes.

Les premiers travaux sur les rythmes biologiques datent du IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère, lorsque le philosophe grec Théophraste, élève d'Aristote, observait l'influence de la lumière sur la croissance des arbres sur l'île de Tylos (aujourd'hui Bahreïn). Mais le terme « circadien » (du latin *circa*, environ, autour ; et *diem*, jour) est bien plus tardif. Il a été proposé en 1729 par l'astronome et mathématicien français Jean-Jacques Dortous de Mairan ; celui-ci avait observé que, même plongée en permanence dans l'obscurité, la sensitive (*Mimosa pudica*) continuait d'ouvrir et de fermer ses feuilles comme elle le faisait habituellement le jour et la nuit.

En 1984, Jeffrey Hall, Michael Rosbach et Michael Young ont montré que ces horloges biologiques, présentes chez les plantes mais aussi chez les cyanobactéries, les champignons, les animaux, etc., sont d'origine génétique. Les trois chercheurs ont reçu cette année le prix Nobel de physiologie et médecine pour cette découverte.

Ces horloges internes sont multiples (horloge du sommeil, de la digestion, de la reproduction etc.) et agissent sur l'organisme entier, mais aussi à l'échelle cellulaire, voire moléculaire. Elles sont codées par plusieurs familles de gènes, nommés par exemple *per* (pour *period* en anglais), *clock* (horloge) ou encore *cry* (pour cryptochrome, un pigment photorécepteur). Ces gènes sont les mêmes chez les mammifères et les insectes. On parle alors de gènes homologues, c'est-à-dire hérités de l'ancêtre commun aux deux groupes – s'ils ne sont pas apparus avant au cours de l'évolution.

Ces gènes contrôlent la période des horloges biologiques (circadienne, saisonnière, etc.) mais ils sont aussi influencés par des facteurs exogènes nommés synchronisateurs, qui sont des événements périodiques aussi bien naturels (le cycle jour/nuit) qu'artificiels (une sonnerie de réveil), et permettant de déclencher un cycle (mais non de le créer). Un changement drastique dans le rythme des synchronisateurs peut chambouler tout un cycle: c'est ce que nous ressentons lors d'un long voyage au cours duquel nous souffrons du décalage horaire. En l'absence de synchronisateur, l'organisme est dit en *free-running* (voir l'encadré page ci-contre).

## UNE HORLOGE DANS LE CERVEAU

Chez les mammifères, on distingue une horloge centrale circadienne dans le cerveau – c'est aussi le cas chez les insectes – et des horloges périphériques (dites aussi harmoniques, car plus ou moins en phase les unes avec les autres) dans les autres organes. Notre horloge centrale est synchronisée par les variations circadiennes de l'intensité lumineuse reçue du Soleil au cours du nyctémère (durée de 24 heures correspondant à la succession d'une nuit, *nux* en grec, et d'un jour, *hêméra*).

Certaines cellules photoréceptrices de notre rétine, une fois stimulées, envoient des neurotransmetteurs dans le nerf optique, lesquels sont ensuite captés par une minuscule zone de l'hypothalamus de 5 millimètres cubes, le noyau supra-chiasmatic, située juste au-dessus du croisement des nerfs optiques. Certaines cellules réceptrices déclenchent alors une cascade de réactions, dont l'expression des gènes *per*: notre horloge interne centrale peut alors démarrer un nouveau cycle. Les cellules de la rétine en jeu (nommées cellules ganglionnaires à mélanopsine, du nom de leur pigment photosensible) sont très spécifiques et ne représentent que 1%

de toutes les cellules rétinienne. Avec le temps, elles s'altèrent naturellement, ce qui expliquerait en partie pourquoi les personnes âgées sont plus sujettes aux insomnies que les jeunes. Pour revenir à l'anniversaire de *Pour la Science*, si nos hémisphères cérébraux fêtent consciemment ses quarante années d'existence, notre hypothalamus préfère, lui, fêter inconsciemment ses (environ) 14 610 cycles de jour et de nuit!

Ainsi, toutes ces horloges biologiques, qu'elles soient centrales ou périphériques, sont cruciales pour l'évolution des espèces, car elles

# Les horloges biologiques sont codées par plusieurs familles de gènes

gouvernent nos cycles vitaux. Sommes-nous pour autant réduits à l'état de pantins réglés comme des métronomes? Et, pour reprendre notre exercice de science-fiction, peut-on imaginer des extraterrestres dotés de cycles très différents?

Si la vie existe ailleurs que sur Terre, nul doute qu'elle est influencée d'une façon ou d'une autre par les cycles astronomiques de sa planète d'origine (rotation sur elle-même, révolution autour de l'étoile, etc.). Dans le film *Pitch Black*, l'équipage d'un vaisseau spatial détenant le dangereux Riddick fait naufrage sur une planète désertique habitée de monstres souterrains. Comme cette planète a une lune et gravite autour de trois étoiles, sa surface est presque toujours éclairée, sauf pendant les rares éclipses où les monstres en question sortent pour se nourrir! Le cycle de vie de ces extraterrestres photosensibles, pour ne pas dire photophobes, semble donc très long, et leur horloge biologique est *a priori* calquée sur l'occultation des astres.

Les découvertes en physique et en biologie nous montrent que définir une durée n'est pas chose facile. La subjectivité est de mise, qu'il s'agisse de l'espèce à laquelle vous appartenez, de la vitesse à laquelle vous vous déplacez ou même de la planète où vous êtes né. Malgré cela, nous pourrions arriver à un consensus et conclure que *Pour la Science* a bien 40 ans... mais peut-être un peu plus, 40 ans et 1 mois, sachant qu'en octobre 1977, *Pour la Science* a eu un numéro pilote! ■

## BIBLIOGRAPHIE

E. B. Roark et al., **Extreme longevity in proteinaceous deep-sea corals**, *PNAS*, vol. 106(13), pp. 5204-5208, 2009.

C. A. Feuillet et al., **Lack of food anticipation in *Per2* mutant mice**, *Current Biology*, vol. 16(20), pp. 2016-2022, 2006.

W. A. Zehring et al., **P-element transformation with period locus DNA restores rhythmicity to mutant, arrhythmic *Drosophila melanogaster***, *Cell*, vol. 39, pp. 369-376, 1984.

T. A. Bargiello et al., **Restoration of circadian behavioural rhythms by gene transfer in *Drosophila***, *Nature*, vol. 312, pp. 752-754, 1984.

# R

## ENDEZ-VOUS

P.108 Logique & calcul  
 P.114 Idées de physique  
 P.118 Chroniques de l'évolution  
 P.122 Science & gastronomie

# COÏNCIDENCES SURPRENANTES, MAIS BANALES

**Des erreurs de jugement nous conduisent à voir dans certaines coïncidences des phénomènes incroyables et à leur rechercher d'impossibles explications.**

**I** est vrai que, en moyenne dans une école primaire, plus les élèves lisent rapidement, plus ils sont grands. En concluons-nous qu'apprendre à lire fait grandir? Plus sérieusement, une étude statistique de Franz Messerli, de l'université Columbia, menée avec toute la rigueur méthodologique nécessaire et publiée en 2012 dans la revue *New England Journal of Medicine*, a établi qu'il existe une étroite corrélation entre la consommation de chocolat par habitant d'un pays et le nombre de prix Nobel obtenus par ce pays par million d'habitants. En déduisons-nous que les chercheurs doivent manger du chocolat pour augmenter leurs chances de se voir attribuer le fameux prix?

L'explication ne serait-elle pas plutôt que le système social et éducatif des pays riches favorise la bonne recherche et donc l'attribution des prix Nobel, et que cette même richesse favorise l'achat par tous de chocolat? Les deux faits sont

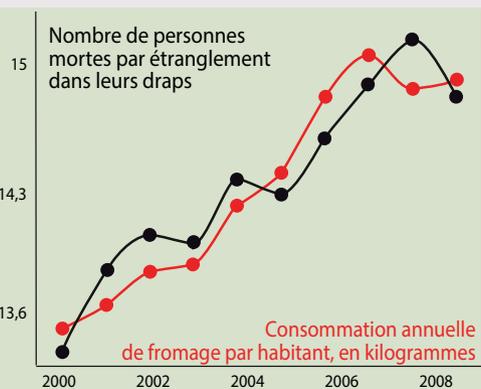
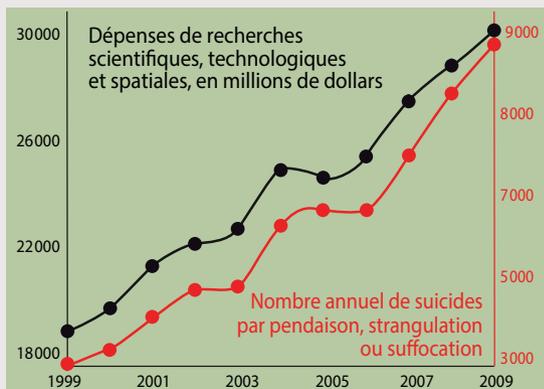
bien liés, mais seulement parce qu'ils sont la conséquence d'une même cause, pas parce que l'un implique l'autre. Quand deux faits sont corrélés, cela ne signifie pas que l'un est la conséquence de l'autre, mais parfois seulement qu'un troisième facteur les entraîne tous les deux. La recherche des liens de causalité entre faits doit être menée avec précaution (voir l'article d'Isabelle Drouet, «Des corrélations à la causalité», *Pour la Science* n° 440, juin 2014).

### DU HASARD PUR?

Hormis ces situations où, malgré tout, la corrélation repérée a une explication satisfaisante faisant intervenir un troisième facteur, tel que l'âge ou la richesse économique, il existe des cas où, en définitive, la seule explication est le hasard.

Les quelques exemples donnés par la figure ci-dessous permettent de comprendre ce que cela signifie. Ces corrélations illusoire ont été

## DES CORRÉLATIONS ÉTONNANTES MAIS FORTUITES, AUX ÉTATS-UNIS



minutieusement collectées par Tyler Vigen quand il était étudiant à la faculté de droit de Harvard, à Cambridge dans le Massachusetts. Il travaille aujourd'hui au Boston Consulting Group et a publié un livre avec ses amusantes découvertes (voir la bibliographie et les sites [www.tylervigen.com/spurious-correlations](http://tylervigen.com/spurious-correlations) ou <http://tylervigen.com/old-version.html>).

L'observation sur un même graphique de la courbe indiquant année après année le nombre de suicides aux États-Unis par pendaison ou suffocation et de la courbe indiquant année après année les dépenses de recherches scientifiques américaines est particulièrement troublante. Quand l'une des courbes baisse ou monte, l'autre la suit en parallèle. La synchronisation est presque parfaite. Elle se traduit en termes mathématiques par un coefficient de corrélation de 0,992082, proche de 1, le maximum possible. Cela établit-il qu'il existe un lien véritable entre les deux séries de nombres ?

Cela est si peu vraisemblable qu'il faut se rendre à l'évidence : c'est uniquement le fait du hasard, ou comme on le dit, une coïncidence. La seule façon raisonnable d'expliquer le parallélisme des deux courbes et des nombreux cas du même type proposés par Tyler Vigen est la suivante :

- Il a collecté un très grand nombre de séries statistiques.
- Il a su les comparer systématiquement, ce qui lui a permis d'en trouver ayant des allures similaires, d'où des coefficients de corrélation proches de 1.
- On ne doit pas s'en étonner : c'était inévitable du fait du très grand nombre de séries numériques pris en compte.

La quantité de données de base est l'explication et Tyler Vigen a détaillé sa méthode : après avoir réuni des milliers de séries numériques, il les a confiées à son ordinateur pour qu'il recherche systématiquement les couples de séries donnant de bons coefficients de corrélation ; il a ensuite fait appel aux étudiants de

sa faculté pour qu'ils lui indiquent, par des votes, les couples de courbes jugés les plus spectaculaires parmi ceux présélectionnés par l'ordinateur.

Cette façon de procéder porte en anglais le nom de *data dredging*, que l'on peut traduire par « dragage de données ». Il est important d'avoir conscience des dangers que créent de tels traitements, surtout aujourd'hui où la collecte et l'exploitation de quantités colossales d'informations de toutes sortes sont devenues faciles et largement pratiquées. La nouvelle discipline informatique qu'est la fouille de données (en anglais, *data mining*) pourrait être victime sans le savoir de ces corrélations illusoire : sans précaution, elle peut prendre ces dernières pour de véritables liens entre des séries de données en réalité totalement indépendantes.

### UNE VICTIME : LA RECHERCHE MÉDICALE

La recherche médicale est fréquemment confrontée au problème de telles corrélations douteuses. Dans un article de 2011, Stanley Young et Alan Karr, de l'Institut américain d'études statistiques, citaient 12 études publiées qui établissaient de soi-disant liens entre la consommation de vitamine et la survenue de cancers. Ces études avaient parfois été réalisées en utilisant un protocole avec placebo et mesure en double aveugle, et semblaient donc sérieuses. Pourtant, quand elles ont été reprises, dans certains cas plusieurs fois, les nouveaux résultats ont contredit les résultats initiaux. Outre que la tentation est grande d'arrondir un peu les chiffres pour qu'ils parlent dans un sens bien clair et permettent la publication d'un article, il se peut simplement que les auteurs de ces travaux aux conclusions impossibles à reproduire aient été victimes d'une situation de mise en corrélation illusoire, comme Tyler Vigen en a repéré de nombreuses.

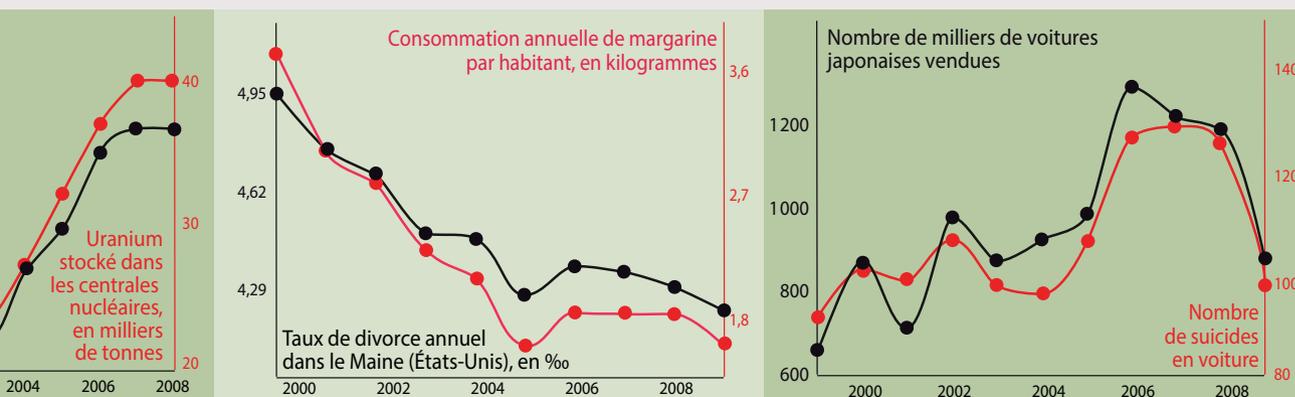
Ce hasard trompeur provenant de l'exploration d'un trop grand nombre de combinaisons est une erreur de jugement statistique. On se >

### L'AUTEUR



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

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



## UNE SURPRISE DE L'INFINI MATHÉMATIQUE

**L'**infini mathématique produit parfois d'étonnantes propriétés dont on pourrait croire à tort qu'elles sont le fait de coïncidences. En voici un exemple : il est possible de trouver un multiple de votre année de naissance (ou de votre numéro de sécurité sociale, ou numéro de carte bancaire) qui ne contienne que des 7 et des 0, les 7 étant tous placés devant les 0. Exemple : le nombre  $m = 1\,968$ , multiplié par  $k = 3\,952\,122\,854\,561\,875$ , donne  $n = 7\,777\,777\,777\,777\,770\,000$ .

Ce qui est vrai pour 1 968 est vrai pour tout nombre entier ! Cela semble magique. Pourtant, c'est assez facile à démontrer. On pourra d'ailleurs aisément écrire un programme qui, pour tout  $m$  donné (pas trop grand !) trouve le  $k$  voulu.

Démonstration : Soit un entier quelconque  $m$ . Considérons tous les nombres  $7, 77, 777, 7777, \dots$  et divisons-les par  $m$ , en notant les restes obtenus. – Deux de ces nombres (et même une infinité de couples) donneront le même reste, car les restes possibles d'une division par  $m$  sont  $0, 1, \dots, m - 1$  et sont donc en nombre fini. – Soustrayons le plus petit du plus grand :  $n = 7777\dots777 - 777\dots77$ . – Par construction, comme différence de deux nombres donnant le même reste quand ils sont divisés par  $m$ , le nombre  $n$  est un multiple de  $m$ . De plus, il est de la forme  $777\dots777000\dots000$ . CQFD.

2

- > trompe en croyant qu'une observation est significative et doit donc être expliquée, alors qu'elle devait se produire (elle ou une autre du même type) du fait du grand nombre d'hypothèses envisagées, parfois collectivement par l'ensemble des équipes de recherche, dans la quête de régularités statistiques.

### DATA SNOOPING

Cette illusion est proche de celle dénommée *data snooping* (« furetage discret de données ») que l'on peut utiliser pour des tromperies délibérées. Pour en illustrer le fonctionnement, Halbert White, de l'université de Californie à San Diego, a suggéré la méthode suivante permettant à un journal financier d'augmenter le nombre de ses abonnés.

La première semaine, le journal envoie un exemplaire gratuit à 20 000 personnes; dans la moitié des numéros envoyés, il est écrit que l'indice boursier (par exemple le Dow Jones) va monter, dans l'autre moitié le journal affirme que l'indice va baisser. Selon que l'indice a effectivement monté ou baissé, le journal envoie la semaine suivante, aux 10 000 adresses qui ont reçu la bonne prévision, un second numéro gratuit, avec dans la moitié des exemplaires l'annonce pour la semaine suivante que l'indice va monter et dans l'autre moitié qu'il va baisser. La troisième semaine, le journal envoie 5 000 numéros gratuits à ceux qui ont reçu la bonne anticipation deux semaines de suite, etc.

À chaque fois, le journal insiste sur le fait qu'il a correctement prévu la tendance depuis plusieurs semaines et propose un bulletin d'abonnement. Au bout de 10 semaines, il ne restera qu'une vingtaine d'envois à faire, mais pour être persuadé que le journal sait prédire la bonne tendance de l'indice boursier, rares sont les lecteurs potentiels qui attendent une prévision exacte 10 fois de suite. Par conséquent, un bon nombre de nouveaux abonnements auront été souscrits à mesure du déroulement des envois.

Une autre situation de *data snooping* dans le traitement des données financières conduit à une navrante désillusion. On cherche des règles du type « Si aujourd'hui le cours de l'action A monte et que le cours de l'action B baisse et que..., alors le cours de l'action X montera demain ». On en écrit un grand nombre, voire on écrit toutes les règles de ce type comportant 10 éléments dans leurs prémisses. On sélectionne ensuite, à l'aide d'une série de données provenant du passé, les meilleures règles. On élimine toutes les règles qui se sont trompées avec les données passées, et on retient seulement celles qui ont toujours fourni une bonne prédiction, ou celles qui ont eu raison le plus souvent. On disposera alors inévitablement d'une série réduite de règles qui, si elles avaient été appliquées sur les données du test, auraient permis de gagner beaucoup d'argent... et qui pourtant ne rapporteront rien dans les semaines qui suivront leur mise en œuvre pour faire des achats et des ventes.

Bien sûr, le piège est connu des chercheurs et des méthodes ont été mises au point pour ne pas être victime de l'illusion. On cherchera par exemple à évaluer, avant de mener la recherche des bonnes règles, la probabilité que lorsque les données sont tirées au hasard l'une des règles de la liste envisagée fonctionne avec ce hasard, et on s'assurera que cette probabilité est proche de 0.

### LOTÉRIE TRUQUÉE?

Qui peut considérer comme normal qu'à quelques jours de distance, la même série de 6 numéros sorte d'un tirage du Loto? C'est pourtant ce qui se produisit le 10 septembre 2009 pour le Loto bulgare. La série 4, 15, 23, 24, 35, 42 n'a rien d'extraordinaire, sauf qu'elle avait déjà été tirée 6 jours auparavant, le 4 septembre, par le même Loto bulgare. Une coïncidence incroyable, au point que le ministre des Sports Svilen Neïkov demanda l'ouverture d'une enquête. Aucune tricherie n'a été détectée, et d'ailleurs les deux tirages avaient eu lieu devant les caméras de la télévision. La chose fut considérée si extraordinaire que la presse dans le monde entier rapporta l'événement.

Plus étonnant peut-être, un an après, à un mois d'intervalle, le 21 septembre et le 16 octobre 2010, le Loto israélien sortit la série 13, 14, 26, 32, 33, 36, provoquant là encore l'étonnement mondial. Comme l'expliquait David Hand dans son article «Des coïncidences pas si étranges» (*Pour la Science* n°438, avril 2014), si l'on prend en compte le nombre de jeux de Loto dans le monde, et le nombre de tirages que chacun d'eux opère, souvent plusieurs fois par semaine, notre étonnement doit cesser.

Plus précisément, considérons le Loto bulgare où l'on tire 6 numéros entre 1 et 49, ce qui donne une probabilité de gagner de 1/13983816. Demandons-nous combien de tirages sont nécessaires pour que l'événement «deux d'entre eux donnent le même résultat» ait une probabilité supérieure à 50% de se produire. La réponse est 4404.

Le calcul est analogue à celui fait pour le célèbre paradoxe des anniversaires, selon lequel dès que 23 personnes sont réunies, la probabilité que deux d'entre elles aient la même date anniversaire dépasse 50%. Cela montre que les événements ressentis comme extraordinaires pour les loteries bulgare et israélienne sont en fait nécessaires. Ce n'est pas la survenue des tirages identiques qui est improbable, mais l'inverse: si tous les tirages étaient toujours différents, nous devrions nous en étonner et en rechercher l'explication.

Une autre source d'étonnements provient des séries rapprochées d'événements rares, tels que les accidents d'avion. Les journalistes aiment mentionner une prétendue «loi des séries», pourtant inconnue des mathématiciens, qui expliquerait ces rapprochements jugés à la fois fortement improbables et explicables par cette introuvable loi... Jacques Chirac disait simplement: «Les emmerdes, ça vole >

# 3

## LOI DE POISSON ET ACCIDENTS D'AVION

**E**n août 2005, une série de cinq catastrophes aériennes s'est produite dans un intervalle de 22 jours, faisant plusieurs centaines de morts au total. Cela nous semble extraordinaire, mais l'est-ce vraiment ?

Élise Janvresse et Thierry de la Rue proposent une belle analyse du problème dans leur petit livre *La Loi des séries, hasard ou fatalité ?* (Le Pommier, 2007). En examinant les données disponibles, ils ont évalué que la probabilité totale d'un accident sur un vol d'au moins 30 passagers est de 0,04 par jour. Ils ont ensuite calculé le nombre total d'accidents auquel il faut s'attendre sur une période donnée. On fait appel à la loi de Poisson, une loi des événements rares introduite par Siméon Denis Poisson en 1837. Elle est appropriée ici, puisque la probabilité que 1 des 20 000 vols quotidiens soit victime d'un accident est  $0,04/20\ 000 = 0,000\ 002$ .

La loi de Poisson fait intervenir un paramètre d'intensité  $\lambda$  calculé à partir du nombre moyen d'accidents sur

la période considérée — soit, pour une journée, 0,04. D'après la loi de Poisson, la probabilité que le nombre  $N$  d'accidents soit égal à l'entier  $k$  durant la période choisie est donnée par la formule :

$$\text{Proba}(N = k) = \exp(-\lambda) \lambda^k / k !$$

Si l'on se fixe une fenêtre particulière de 22 jours, alors l'intensité pour cette période vaut  $\lambda = 0,04 \times 22 = 0,88$ .

La probabilité pour qu'il n'y ait eu que 0, 1, 2, 3 ou 4 accidents est donc :

$$\begin{aligned} \text{Proba}(N \leq 4) &= \text{Proba}(N = 0) + \\ &+ \text{Proba}(N = 1) + \text{Proba}(N = 2) + \\ &+ \text{Proba}(N = 3) + \text{Proba}(N = 4) = \\ &= \exp(-0,88)[1 + 0,88^1 + \\ &+ 0,88^2/(2 \times 1) + 0,88^3/(3 \times 2 \times 1) \\ &+ 0,88^4/(4 \times 3 \times 2 \times 1)] = 0,9978. \end{aligned}$$

La probabilité qu'il y ait eu 5 accidents ou plus dans la période de 22 jours fixée est donc  $1 - 0,9978 = 0,0022$ , ce qui est faible.

La série malheureuse de catastrophes de 2005 serait donc extraordinaire !

Ce serait oublier qu'il faut envisager non pas une fenêtre de 22 jours, mais toutes les fenêtres de 22 jours présentes durant une année. Le calcul est assez compliqué, car les fenêtres à envisager se chevauchent. Élise Janvresse et Thierry de la Rue ont donc fait usage de ce qu'on nomme les statistiques de balayages, mises au point assez récemment pour traiter ce type de problèmes.

Ils concluent que la probabilité que, durant une année donnée, il se produise 5 accidents aériens graves ou plus dans une fenêtre de 22 jours est 11%. C'est assez faible, mais cela rend la série malheureuse de 2005 peu étonnante, d'autant plus que le calcul mené ne prend pas en compte les variations saisonnières du trafic aérien qui, en concentrant les vols sur certaines périodes, augmentent le 11% obtenu.

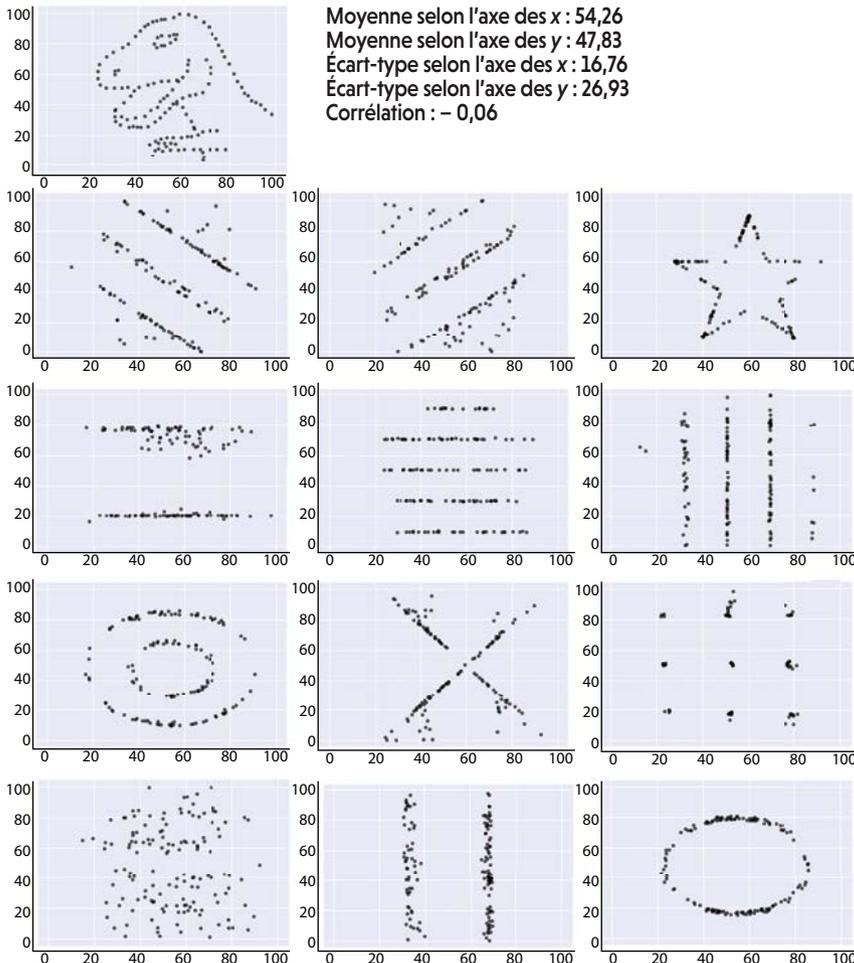


## MÊMES PARAMÈTRES... ET POURTANT SI DIFFÉRENTS

4

**N**ous pensons en général que si des données ont des paramètres statistiques proches (moyennes, écarts-types, etc.), elles se ressemblent nécessairement. Les paramètres statistiques, pensons-nous, sont comme des versions compressées des séries de données. Justin Matejka et George Fitzmaurice prouvent graphiquement que c'est faux. À l'aide d'une méthode qui leur permet de créer facilement des séries ayant exactement les mêmes paramètres statistiques, ils ont notamment produit ces 13 schémas, utiles à tous ceux qui souhaitent prendre conscience de notre fragile compréhension intuitive du hasard et des statistiques.

Il s'agit de graphiques de séries de couples de nombres  $(x, y)$ , qui apparaissent très différents. Pourtant, d'une série à l'autre, les 5 paramètres suivants sont les mêmes : moyenne des  $x$ , écart-type des  $x$ , moyenne des  $y$ , écart-type des  $y$ , corrélation entre les  $x$  et les  $y$ . Lorsque la corrélation entre les  $x$  et les  $y$  est parfaite, ce type de schéma est une droite. (Voir J. Matejka et G. Fitzmaurice, « Same stats, different graphs : Generating datasets with varied appearance and identical statistics », *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1290-1294, ACM, 2017.)



> toujours en escadrille!... Certaines analyses tentent d'en identifier l'origine en parlant d'une « attente excessive d'étalement » (voir mon article « Notre vision du hasard est bien hasardeuse », *Pour la Science* n° 293, mars 2002) : notre intuition nous souffle à tort que, par exemple, les dates des accidents d'avion doivent être régulièrement espacées, alors que les statistiques nous montrent autre chose.

Cette attente excessive d'étalement a été clairement analysée dans les cas précis des accidents d'avions par Élise Janvresse et Thierry de la Rue, de l'université de Rouen (voir l'encadré 3 page 111).

### DES SÉRIES TRÈS DIFFÉRENTES, MAIS AYANT LA MÊME STATISTIQUE

Notre bon sens est défaillant pour traiter les probabilités et nous sommes surpris dans des cas où il n'y a pas lieu de l'être. Utiliser le mot « coïncidence » n'explique rien ou alors cela introduit des idées étranges comme la synchronicité de Carl Gustav Jung ou les champs morphiques de Rupert Sheldrake, dont les scientifiques ont vainement cherché à prouver l'existence (voir par exemple [www.sceptiques.qc.ca/dictionnaire/](http://www.sceptiques.qc.ca/dictionnaire/)).

Cette faiblesse de notre esprit à percevoir correctement les probabilités a encore récemment été mise en évidence. On est tenté de penser que si des données ont des paramètres statistiques proches, elles doivent nécessairement se ressembler; or Justin Matejka et George Fitzmaurice, de la société Autodesk Research à Toronto, ont créé délibérément des exemples magnifiques montrant que c'est faux.

Pour engendrer leurs séries, ils ont mis au point une technique qui leur permet de jouer facilement avec les formes des graphes créés. Ainsi, la figure de l'encadré 4 ci-contre visualise une collection de 13 séries de couples de nombres  $(x, y)$  qui, malgré leurs graphes très différents (chaque couple  $(x, y)$  représentant un point du plan), ont les mêmes 5 paramètres suivants : moyenne des  $x$ , écart-type des  $x$ , moyenne des  $y$ , écart-type des  $y$ , corrélation entre les  $x$  et les  $y$ .

### SIMPLE ET INATTENDU

Toujours afin de comprendre et de classifier les situations où notre esprit s'étonne alors qu'il ne devrait pas, détaillons à présent un cas moins connu, car lié à une théorie assez récente. La mauvaise compréhension de ce qui est probable, car simple, conduit à percevoir certains événements comme étonnants alors qu'ils ne le sont pas, et donc à croire être en présence de coïncidences miraculeuses sans bonne explication, alors que la situation est banale.

La notion la plus générale de simplicité est celle qui provient de la théorie algorithmique de l'information. Comme nous n'en avons pas

## BIBLIOGRAPHIE

T. Vigen, **Spurious Correlations**, Hachette Books, 2015.

F. Messerli, **Chocolate consumption, cognitive function, and Nobel laureates**, *The New England Journal of Medicine*, vol. 367(16), pp. 1562-1566, 2012.

S. Young et A. Karr, **Deming, data and observational studies**, *Significance*, vol. 8(3), pp. 116-120, 2011.

H. Zenil et J.-P. Delahaye, **On the algorithmic nature of the world**, dans G. Dodig-Crnkovic & M. Burgin (éds.), *Information and Computation*, World Scientific, 2010 (<https://arxiv.org/abs/0906.3554>).

H. White, **A reality check for data snooping**, *Econometrica*, vol. 68(5), pp. 1097-1126, 2000.

toujours une bonne compréhension, cela nous conduit à voir des choses complexes et inattendues quand il n'y a en fait que des choses simples. Cette théorie algorithmique de l'information, ou théorie de la complexité de Kolmogorov, mesure la complexité d'un objet par la taille du plus petit programme qui l'engendre. Elle s'applique aux objets numériques, ou susceptibles d'être représentés numériquement, tels que les images, les sons, les films, et à la plupart des objets du monde réel, si l'on ne prend en compte que leur apparence.

La théorie suggère que parmi les objets utilisant le même nombre de bits d'information (par exemple des images d'un million de pixels), les plus simples, c'est-à-dire ceux ayant la plus faible complexité de Kolmogorov, sont ceux qu'on rencontrera le plus fréquemment. Cela découle d'un théorème de Leonid Levin d'après lequel plus la complexité de Kolmogorov d'un objet ou d'une structure est élevée, moins il est probable que cet objet ou cette structure soit produite par une machine prise au hasard.

Si l'on pense que le monde physique est une sorte de grand système d'interactions menant une forme de calcul qui produit les objets et structures qu'on y rencontre, il est alors naturel de penser que les objets présents dans le monde y apparaissent avec une probabilité liée à leur mesure de Levin, et donc que les plus simples au sens de la complexité de Kolmogorov sont les plus fréquents. Des détails sur cette idée sont donnés dans un article d'Hector Zenil et moi-même (*voir la bibliographie*). Notons qu'il s'agit d'une idée conforme à l'intuition: dans une image numérique en noir et blanc représentant une photo prise du monde réel, on a plus de chances de rencontrer la série de 10 pixels blancs, *bbbbbbbbb*, qui a une faible complexité de Kolmogorov, que la série précise *bnbbnbnbb* dont la complexité de Kolmogorov est supérieure.

Une étoile est sphérique, comme le sont beaucoup de fruits. La section d'un tronc d'arbre est circulaire, comme le sont aussi les roues qui équipent nos véhicules. Une tige de blé est parfaitement rectiligne, comme les arêtes d'un cristal. La surface d'un lac est plane comme l'est, regardée de près, la peau de nombreux animaux. Tout cela correspond à des formes simples au sens de la théorie de Kolmogorov. Dans ces cas-là, nous ne cherchons donc pas à trouver une origine commune à deux objets sphériques, ou rectilignes, ou plans. Les formes simples n'ont pas nécessairement une origine commune, leur simplicité suffit à expliquer qu'on les retrouve partout. Jusqu'ici, tout va bien.

En revanche, certains objets ou formes que la théorie de la complexité de Kolmogorov identifie comme simples ne sont pas perçus comme tels par notre jugement immédiat. Une



Certains coquillages arborent à leur surface des motifs très semblables à la figure fractale dénommée triangle de Sierpiński, obtenue en enlevant d'un triangle un triangle central et en répétant indéfiniment l'opération (à droite). Ces motifs sont perçus comme complexes, alors qu'ils sont algorithmiquement simples.

structure comme celle du triangle de Sierpiński (*voir la figure ci-dessus*) nous apparaît complexe alors qu'elle ne l'est pas, puisque des programmes très courts l'engendrent. Si l'on rencontre souvent cette forme dans la nature, en particulier à la surface des coquillages, c'est parce que cette structure est simple, comme le sont une sphère ou un segment de droite.

Nous ne devons donc pas nous émerveiller de ces rencontres multiples sans lien, ni surtout imaginer qu'elles proviennent d'une sorte de fonctionnement secret de l'Univers qui resterait à comprendre. Comme pour la sphère, leur simplicité est l'explication de leur fréquente apparition.

Ce qui est vrai pour le tapis de Sierpiński l'est aussi pour la suite de Fibonacci, dont certains s'émerveillent à tort qu'on la rencontre si souvent. C'est encore vrai pour le nombre d'or, qui suscite une superstition numérolgique. Cela l'est encore d'une multitude de formes fractales qui sont simples et dont on ne doit donc pas s'étonner de les rencontrer. Il est normal que les objets de faible complexité de Kolmogorov se retrouvent partout. Rechercher une explication profonde à la présence multiple de la suite de Fibonacci dans toutes sortes d'objets naturels ou artificiels est aussi naïf que rechercher une explication commune à la présence de longs segments rectilignes dans les arbres, dans les tracés dessinés par les couches géologiques, les stalagmites ou dans le ciel quand une météorite pénètre l'atmosphère terrestre.

Nous percevons facilement la simplicité de certaines formes, mais pour d'autres, il nous faut réfléchir à la théorie qui permet de comprendre la simplicité. Si nous réussissons, nous serons moins enclins à vouloir expliquer ce que nous percevons comme des coïncidences. Ici, comme pour les doubles tirages identiques au Loto, ou les courbes parallèles montrant des corrélations illusoire, nous devons éviter de rechercher des causes communes à ce qui, logiquement, n'en a pas besoin. ■

## LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY**  
professeur de physique  
à l'université  
Pierre-et-Marie-Curie,  
à Paris



**ÉDOUARD KIERLIK**  
également professeur  
de physique à l'université  
Pierre-et-Marie-Curie

# VOIR LA NUIT COMME EN PLEIN JOUR

**Bien voir quand il y a très peu de lumière est possible... à condition de s'équiper d'appareils de vision nocturne, des systèmes amplificateurs qui transforment chaque photon en une cascade d'électrons.**

**L**orsque la nuit tombe et que nous peinons à distinguer quoi que ce soit, les lynx, chouettes et autres animaux noctalopes voient, eux, parfaitement leur environnement. Leurs yeux sont capables de tirer profit du peu de lumière qui reste. Mais nous autres humains sommes capables de les imiter, grâce à des lunettes, jumelles ou caméras ultrasensibles qui exploitent, à l'aide de systèmes électroniques, le moindre photon disponible.

## UN ŒIL TRÈS SENSIBLE

Afin de comprendre comment fonctionnent ces appareils, faisons d'abord un détour par le mécanisme de la vision humaine (ou animale). En pleine nuit, lorsque notre œil est parfaitement habitué à l'obscurité et que nous observons le ciel par une nuit sans lune, il suffit qu'un seul photon atteigne notre rétine pour produire un signal nerveux interprétable par notre cerveau. Cette sensibilité nous permet de deviner la présence d'étoiles très peu brillantes dans le ciel et, plus généralement, la présence d'une source lumineuse très faible. Mais elle est

insuffisante pour distinguer des objets plongés dans la pénombre, par exemple.

Ce contraste entre une haute sensibilité à la lumière et l'incapacité de distinguer les formes dans l'obscurité profonde tient à la physiologie des yeux humains, plutôt adaptés à la vision de jour et en couleur.

La partie centrale de notre rétine est couverte de cônes, des photorécepteurs dont la déclinaison en trois types est à l'origine de notre vision trichromatique des couleurs. Tout le reste est tapissé de bâtonnets, d'un seul type, qui conduisent à une vision monochrome. Comme la surface de collecte des bâtonnets est bien plus grande que celle des cônes, ce sont eux qui assurent notre vision en situation de faible intensité lumineuse.

Le fonctionnement de ces bâtonnets est instructif. Quand un photon incident est absorbé par la rhodopsine, un pigment photosensible présent dans la cellule bâtonnet, il entraîne dans 70 % des cas le changement de conformation d'une molécule, lequel déclenche des réactions en chaîne qui vont conduire à la fermeture d'un grand nombre de canaux ioniques de la paroi cellulaire. Chaque

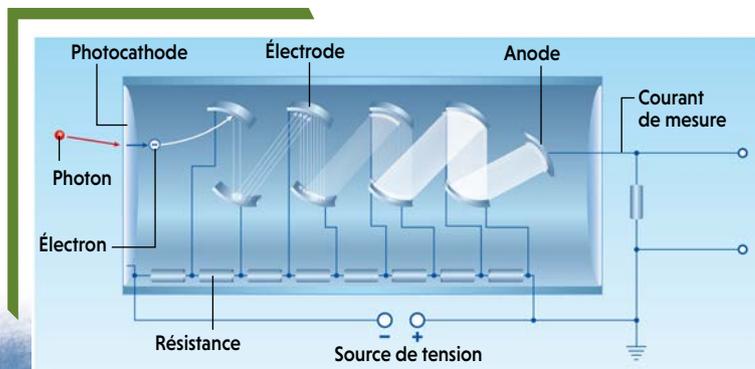
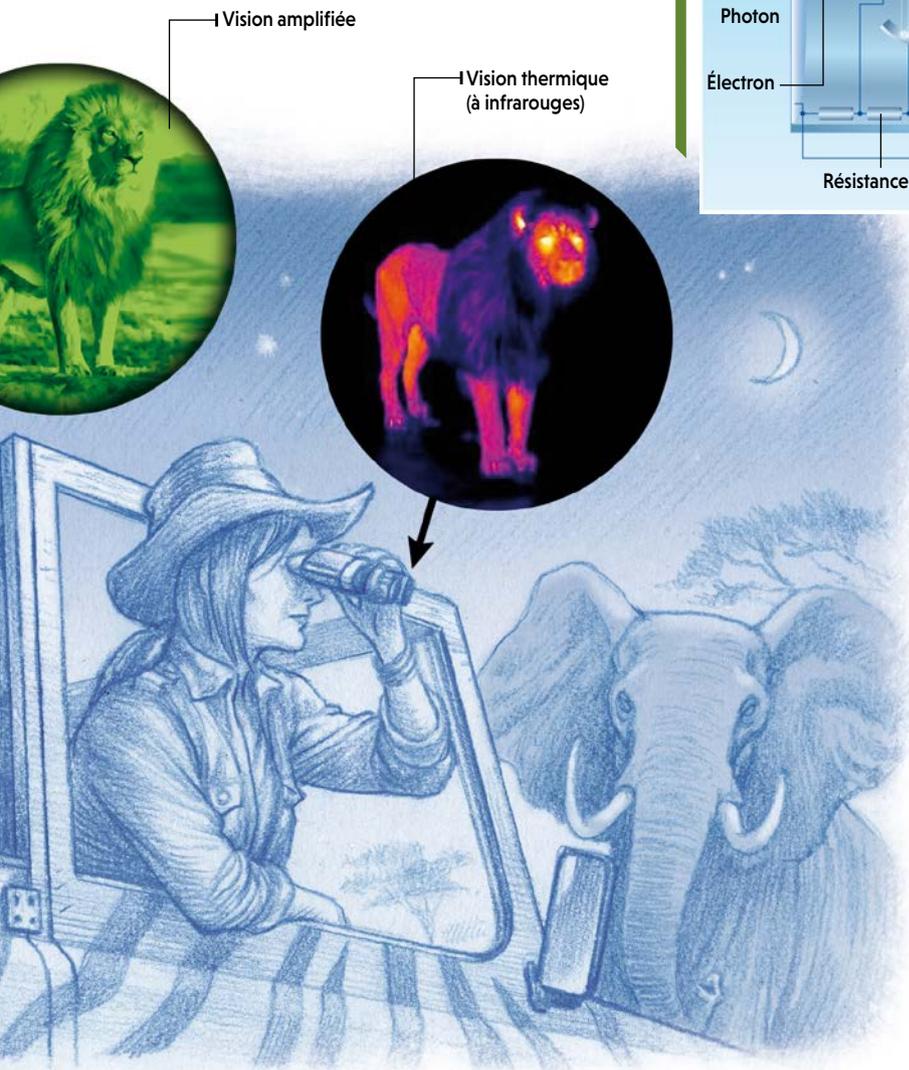


étape de ce processus en cascade implique la formation de molécules qui catalysent chacune plusieurs dizaines de réactions de l'étape suivante.

L'arrivée d'un seul photon bloque ainsi le passage, à travers la paroi de la cellule réceptrice, de près de 100 millions d'ions en une fraction de seconde. C'est assez pour donner naissance à un signal nerveux d'une intensité électrique d'environ un demi-picoampère (soit  $0,5 \times 10^{-12}$  ampère).

## CONVERTIR LES PHOTONS PAR EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

En s'inspirant de ces mécanismes, ne serait-il pas possible de réaliser un dispositif qui traduise l'arrivée d'un photon en



## MULTIPLIER LES ÉLECTRONS

**D**ans un tube photomultiplicateur classique, chaque photon incident qui frappe la photocathode est converti, par effet photoélectrique, en un électron. Ce dernier est accéléré par la différence de potentiel avec l'électrode suivante et, lorsqu'il atteint celle-ci, déclenche l'éjection d'électrons supplémentaires. Et ainsi de suite, les électrons sont multipliés en cascade, jusqu'à une anode qui recueille un nombre d'électrons suffisant pour constituer un signal électrique mesurable.

Avec des jumelles à vision amplifiée, toute la scène observée est visible. Ce n'est pas le cas avec un appareil à infrarouges, qui ne visualise (en fausses couleurs) que des contrastes de température.

un signal électrique mesurable? C'est exactement ce que fait un photomultiplicateur. La première étape est de convertir le photon incident en un électron. À cette fin, on dispose de l'effet photoélectrique: lorsqu'un photon arrive sur une plaque métallique, il peut être absorbé et éjecter un électron du matériau si l'énergie du photon est supérieure à un seuil, nommé travail de sortie, qui quantifie la force du lien entre les électrons libres du métal et le réseau cristallin de ce dernier.

Pour de l'aluminium ou du zinc, ce seuil est de l'ordre de 4 électronvolts, ce qui correspond à de la lumière ultraviolette. Si l'on veut détecter de la lumière visible (de l'ordre de 2 électronvolts par

photon), il faut trouver des matériaux ayant un travail de sortie plus faible. Le premier matériau utilisé à cette fin était, en 1929, un composé d'argent, d'oxygène et de césium (Ag-O-Cs). Il permet de détecter la lumière de longueur d'onde comprise entre 300 nanomètres et 1200 nanomètres, soit tout le spectre visible ainsi que le proche infrarouge.

On a depuis développé de nombreux matériaux adaptés à différentes parties du spectre. La plupart font appel à des atomes alcalins (sodium, potassium, césium...) ou à des semi-conducteurs (tellure, indium, arsenic, gallium...). En pratique, on dépose une mince couche de ces matériaux sur la paroi en verre d'une cellule à vide.

Que faire alors de cet unique électron arraché au métal et qui se déplace désormais dans le vide? On l'accélère et on le précipite sur une première électrode. Avec une tension accélératrice de l'ordre d'une centaine de volts, il acquiert suffisamment d'énergie (environ 100 électronvolts...) pour que l'impact sur l'électrode arrache 5 électrons à cette dernière. On répète alors le processus: ces électrons sont de nouveau accélérés vers >

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



> une seconde électrode et produisent chacun 5 nouveaux électrons. Et ainsi de suite une dizaine de fois. Dans un photomultiplicateur à 12 étages, le nombre final d'électrons est de l'ordre de  $5^{12}$ , soit  $10^8$ , le même ordre de grandeur que la charge électrique mobilisée dans l'absorption d'un photon par une cellule rétinienne. Cette charge est suffisante pour être transportée et traitée électroniquement.

La solution semble donc acquise... à condition de ne pas se préoccuper de l'encombrement d'un photomultiplicateur, qui fait quelques centimètres de long et de large. Et tout cela pour l'équivalent d'un seul pixel! Heureusement, depuis les années 1970, il existe bien plus petit: les galettes de microcanaux, qui équivalent à des réseaux de photomultiplicateurs de taille micrométrique.

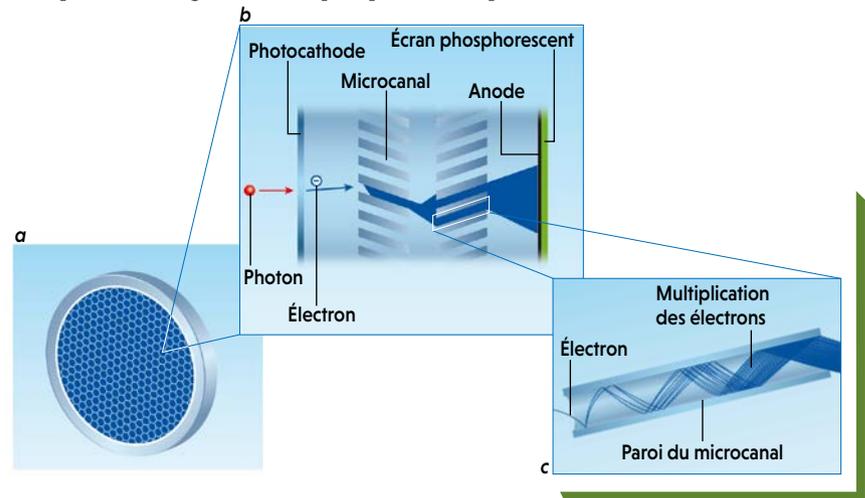
### MINIATURISER LE PHOTOMULTIPLIEUR... ET LE MULTIPLIER!

Ces galettes sont constituées d'un matériau de résistance électrique élevée, épais de 2 millimètres et percé en biais d'un réseau de canaux microscopiques. Ceux-ci ont un diamètre d'une dizaine de micromètres et sont distants les uns des autres d'une quinzaine de micromètres. Les deux faces de la galette sont alors portées à une différence de potentiel de plus de 1000 volts. Étant donné la forte résistance électrique du matériau, le courant électrique qui circule le long de la paroi de chaque microcanal est très faible, et le potentiel électrique y augmente linéairement d'une extrémité à l'autre.

C'est pourquoi le microcanal se comporte comme la version continue des étages d'un photomultiplicateur. Lorsqu'un électron arrive perpendiculairement sur la face avant de la galette, il a de bonnes chances de s'engouffrer dans un microcanal. Comme celui-ci est percé en biais, l'électron frappe forcément la paroi en début du canal. S'il a été préalablement accéléré, son énergie est suffisante pour qu'il arrache plusieurs électrons. Ces derniers, en raison de l'intense champ électrique régnant dans le canal, prennent de la vitesse et viennent frapper la paroi un peu plus loin. Chacun d'eux arrache à son tour plusieurs électrons; et ainsi de suite. On retrouve le mécanisme de photomultiplication, avec un gain de l'ordre de 10 000 entre l'entrée et la sortie. En plaçant deux galettes l'une après l'autre, on peut atteindre un gain total de 100 millions sur une épaisseur de quelques millimètres.

## LES GALETTES DE MICROCANNAUX

Ces dispositifs (a), dont la taille avoisine celle d'une pièce de monnaie pour une épaisseur d'à peine quelques millimètres, sont percés de plusieurs millions de canaux microscopiques. Ceux-ci sont répartis en deux couches parallèles et sont orientés de biais par rapport à l'axe de la galette (b). Chaque microcanal, où la tension électrique sur les parois augmente linéairement d'une extrémité à l'autre, se comporte comme la version continue d'un tube photomultiplicateur (c). Le photon incident est converti par effet photoélectrique en un électron; ce dernier pénètre dans un microcanal dont il heurte la paroi et subit ainsi une multiplication (qui se poursuit dans la seconde couche de microcanaux); l'ensemble des électrons ainsi produits atterrissent l'écran phosphorescent qui les transforme en lumière.



Pour compléter le dispositif, il suffit de placer en avant de cette galette un matériau qui émet des électrons par effet photoélectrique, et à l'arrière un mince écran de phosphore qui émet de la lumière là où frappent des électrons. Les électrons étant canalisés par les microcanaux, l'image lumineuse formée sur l'écran phosphorescent est la copie amplifiée de l'image incidente. Les lunettes, caméras et autres jumelles de vision nocturne sont ainsi composées d'un objectif, qui forme une image sur la face avant du dispositif d'amplification lumineuse, et d'un oculaire, qui permet de visualiser l'image formée sur l'écran de phosphore.

Évidemment, avec ces mécanismes, on obtient toujours une vision nocturne monochrome. Mais ce défaut n'est peut-être pas définitif: la société française Photonis commercialise depuis peu des caméras munies d'un nouveau type de capteur à base de CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, des composants de même type que ceux des appareils photo), où un quart des pixels servent à mesurer la couleur tandis que les trois autres quarts fournissent l'image. Un algorithme reconstitue alors une image colorisée. La contrepartie est que la sensibilité des capteurs à CMOS n'égale pas encore celle des galettes de microcanaux: ces caméras ne sont pas faites pour des nuits trop noires. ■

### BIBLIOGRAPHIE

A. G. Wright,  
**The Photomultiplier Handbook**, Oxford University Press, 2017.

M. Lampton,  
**L'intensificateur d'images à microcanaux**,  
*Pour la Science*, n° 51,  
pp. 46-57, janvier 1982.



## L'AUTEUR



**HERVÉ LE GUYADER**  
professeur émérite de biologie  
évolutive à l'université  
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

Sa bouche est une ventouse  
en forme d'entonnoir.



# LE VER, L'ESCARGOT ET L'AMIBE

**Ou comment la lutte contre un ver parasite de l'homme a révolutionné notre vision de l'origine des animaux...**

**I** l y a encore quelques années, *Capsaspora owczarzaki* n'était connu que de quelques zoologistes. Mais récemment, cet organisme unicellulaire au nom imprononçable est devenu la coqueluche des évolutionnistes : sa situation phylogénétique alliée à ses caractéristiques biologiques en font un organisme exceptionnel pour comprendre comment les animaux pluricellulaires ont pu apparaître.

## UN ESCARGOT PARASITÉ

Comme souvent en biologie, cette découverte s'est produite à la suite d'un invraisemblable concours de circonstances. Tout commence par la lutte contre la bilharziose, une maladie parasitaire provoquée par les schistosomes, des vers plathelminthes hématophages sévissant dans les zones tropicales d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud. Le parasite se reproduit suivant un cycle complexe nécessitant le passage par un hôte intermédiaire, un gastéropode pulmoné d'eau douce proche des planorbes. En Amérique du Sud et dans la Caraïbe, il s'agit de *Biomphalaria glabrata*, colonisé par *Schistosoma mansoni*. La forme infestante de l'homme est la cercaire, une larve nageuse évadée du

gastéropode et qui traverse la peau par effraction. Après des migrations dans le système cardiovasculaire et plusieurs métamorphoses, le parasite s'installe près du foie et y devient sexuellement mature. Les œufs pondus par la femelle passent dans l'intestin et sont évacués avec les fèces. Dans l'eau douce, l'œuf éclôt et donne le miracidium, une larve ciliée nageuse qui infeste *B. glabrata* et s'y transforme en sporocyste, d'où bourgeonnent les cercaires. La lutte contre la bilharziose nécessite donc la connaissance précise de la vie de cet escargot.

Plusieurs équipes se lancent donc dans l'étude de la biologie de *B. glabrata*. C'est ainsi qu'au cours des années 1970, certaines souches résistantes à *S. mansoni* sont découvertes, entre autres à Porto Rico. Alfred Owczarzak, zoologiste à l'université d'Oregon, aux États-Unis, découvre en 1979 que des cellules à l'allure d'amibes circulent dans l'hémolymphe du gastéropode, s'attaquent aux sporocystes du schistosome et s'en nourrissent. Réussissant à cultiver ces cellules, Owczarzak comprend qu'elles ne proviennent pas de l'animal (comme nos globules blancs) : ce sont des organismes unicellulaires symbiotes qui débarrassent *B. glabrata* de ses parasites.



*Schistosoma mansoni*  
Taille : 1 cm env. (mâle)  
1,4 cm env. (femelle)



*Biomphalaria glabrata*  
Taille : 0,5 à 1 cm  
(coquille)

Hermaphrodite  
simultané (mâle et  
femelle en même  
temps), il pratique  
l'autofécondation.



Le mâle (*en rose*) est plat, mais paraît cylindrique, car ses bords relevés forment un canal. La femelle (*en vert*), cylindrique, se loge dans ce canal, ce qui permet un accouplement quasi permanent tandis que les vers se déplacent dans le sang de leur hôte humain.

Ce ver n'a pas d'anus. Il régurgite les éléments non absorbés...

C'est sous la forme d'une larve de quelques dizaines de micromètres, le miracidium, que *S. mansoni* infecte l'escargot.

## EN CHIFFRES

# 180 millions

d'individus environ sont atteints de la bilharziose dans le monde, principalement en Afrique. Cette maladie cause environ 280 000 décès par an.

## 12 heures

environ, telle est l'autonomie de la cercaire, la larve nageuse de *S. mansoni* qui infecte l'humain. Comme elle ne se nourrit pas, si elle ne trouve pas d'hôte durant cette période, elle meurt.

## 66,5 millions

de personnes ont été traitées contre la bilharziose en 2015.

D'après leurs caractères cytologiques, il les classe dans le genre *Nuclearia*, au sein d'un taxon maintenant proche des champignons. Vingt ans plus tard, dans le même laboratoire, un ancien étudiant d'Owczarzak montre par phylogénie moléculaire qu'il ne s'agit pas d'un *Nuclearia*, mais d'un organisme d'un nouveau genre qu'il nomme *Capsaspora*, dédiant le nom d'espèce à son professeur. Fait majeur: *C. owczarzaki* est proche non pas des champignons, mais des animaux pluricellulaires, les métazoaires. Plus précisément, le taxon des filastères auquel il appartient est le groupe frère de celui rassemblant les choanoflagellés (des organismes unicellulaires) et les métazoaires.

### UNE AMIBE GRÉGAIRE

D'étranges observations réalisées au sein du système circulatoire de *B. glabrata* se trouvent vite confirmées par des cultures *in vitro*. Le cycle de *C. owczarzaki* présente trois phases au cours desquelles les cellules se différencient et apparaissent sous des aspects très différents: amibes munies de longs bras (filopodes), kystes flottants et agrégats de cellules (voir l'encadré page 120). Apparaît donc une phase multicellulaire – simple, car les cellules ne sont pas jointives, mais qui interpelle, vu la proximité phylogénétique de *C. owczarzaki* avec les métazoaires.

Construire une structure pluricellulaire et procéder à la différenciation cellulaire sont les deux propriétés essentielles des métazoaires. Or cela nécessite plusieurs caractéristiques. D'une part, les cellules doivent avoir une cohésion entre elles – c'est le rôle de la matrice extracellulaire. D'autre part, au cours de l'embryogenèse,

les cellules se différencient en cellules épidermiques, nerveuses, musculaires, hépatiques, etc. grâce à deux processus dynamiques: par interactions avec ses voisines, chaque cellule « connaît » sa situation dans l'embryon, ce qui orientera sa différenciation de manière harmonieuse; puis, par une régulation fine de l'expression des gènes *via* des régulateurs de transcription, la différenciation cellulaire sera effective. *C. owczarzaki* présenterait-il lui aussi ces caractéristiques? C'est ce qu'ont vérifié Iñaki Ruiz-Trillo et son équipe, à l'Institut de biologie évolutive de Barcelone.

Premier travail, scruter la structure du génome. Il s'agit en particulier d'y rechercher des gènes essentiels pour la mise en œuvre de ces caractéristiques – plus exactement des séquences ressemblant à celles qui codent les domaines essentiels de protéines des métazoaires impliquées dans la cohésion cellulaire. Les résultats sont impressionnants. *C. owczarzaki* produit les protéines qui structurent la matrice extracellulaire des métazoaires comme le collagène, les fibronectines ou les laminines. De plus, la machinerie d'adhésion des cellules à la matrice est complète; elle est orchestrée par les intégrines, des protéines transmembranaires qui, outre leur rôle de structure, transmettent des signaux de la matrice vers l'intérieur de la cellule. On trouve aussi les principaux composants d'un complexe qui joue un rôle charnière entre le cytosquelette interne et la matrice extracellulaire.

Ces études de génomique montrent également que de nombreux régulateurs de transcription, majeurs pour la différenciation cellulaire des métazoaires, sont présents chez *C. owczarzaki*. Ce dernier porte >

> même les composants d'une voie de signalisation indispensable au développement de l'embryon chez les métazoaires, la voie Notch. Chez les métazoaires, l'activation d'un récepteur membranaire (Notch) par un ligand extracellulaire (Delta) entraîne une cascade d'activations qui régule la transcription de certains gènes. Or, chez *C. owczarzaki*, les composants de la voie Notch sont présents, mais Notch et Delta n'interagissent pas!

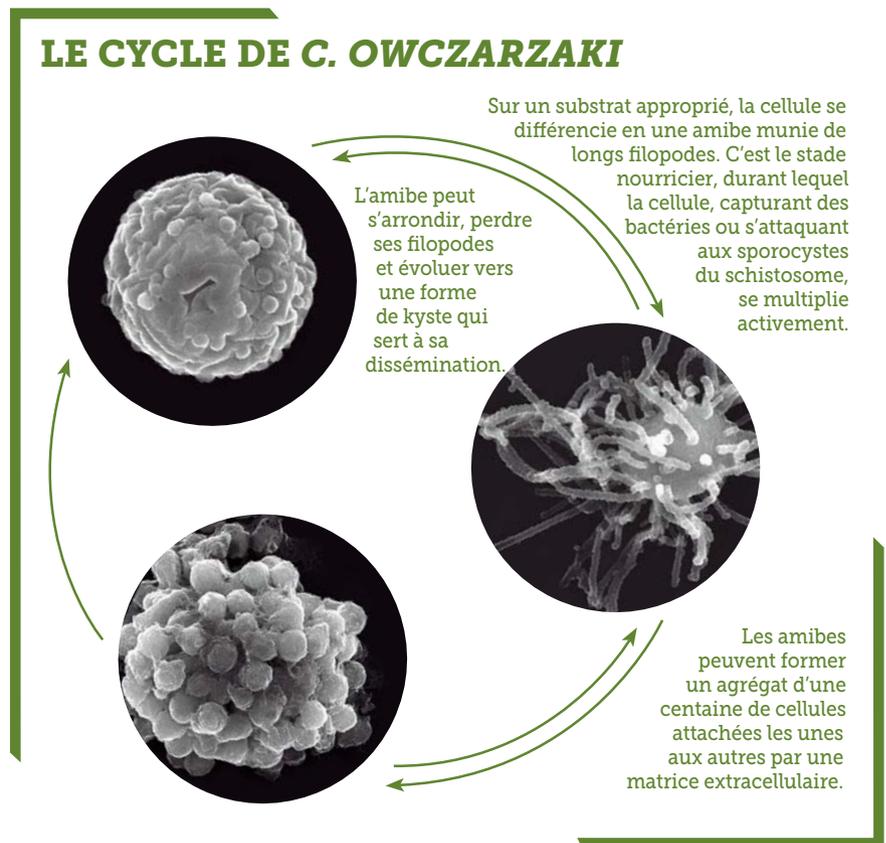
Iñaki Ruiz-Trillo s'est également penché sur les différents stades du cycle de *C. owczarzaki*. Pour cela, il a étudié et comparé leurs transcriptomes, c'est-à-dire l'ensemble des ARN messagers présents dans les cellules. On peut savoir ainsi quels gènes sont exprimés ou réprimés. Ici encore, le résultat est remarquable: plus de la moitié des 8637 gènes s'expriment différemment selon le stade. On a donc affaire à une véritable différenciation cellulaire...

Ces résultats sont fascinants, car ils signifient que la plupart des gènes impliqués dans la multicellularité et le développement des métazoaires étaient déjà présents chez l'ancêtre commun unicellulaire des métazoaires et des filastères. Il y a donc eu cooptation de gènes ancestraux pour de nouvelles fonctions: les gènes qui semblent caractéristiques des animaux pluricellulaires actuels ont en fait d'abord évolué dans un contexte unicellulaire avant d'être réutilisés dans un contexte pluricellulaire. «En biologie, on fait du neuf avec du vieux», comme disait François Jacob!

### DU TEMPOREL AU SPATIAL

Depuis que Charles Darwin a compris que classer les organismes revient à en chercher les relations de parenté, la question de l'origine des animaux s'est trouvée posée. Le naturaliste et embryologiste allemand Ernst Haeckel fut le premier à proposer, dès 1868, une succession de stades évolutifs copiée sur celle des stades embryologiques du cnidaire *Monoxenia darwini*: une simple cellule devient un agrégat de cellules simples (moraea), puis une vésicule sphérique constituée d'une couche de cellules identiques (blastaea), puis une structure à deux feuilletts avec cavité intestinale (gastrea). On constate que, dans l'esprit de Haeckel, la multicellularité a été acquise avant la différenciation cellulaire.

Or on sait maintenant que les filastères, comme les métazoaires, présentent une différenciation cellulaire. Mais attention, pas la même! Chez *C. owczarzaki*, elle est successive – les stades se suivent –, tandis que chez les métazoaires, elle est simultanée – plusieurs types cellulaires



coexistent en même temps dans l'organisme. Étant donné que l'ancêtre commun de *C. owczarzaki* et des métazoaires était unicellulaire, on peut faire l'hypothèse que d'un point de vue évolutif, la différenciation cellulaire a d'abord été successive avant de devenir simultanée. Autrement dit, la régulation de la différenciation est passée de temporelle à spatiale.

C'est maintenant que l'observation de la différence de la voie Notch décrite ci-dessus prend tout son sel. En effet, chez les métazoaires, cette voie est dite juxtacrine, c'est-à-dire qu'elle joue entre deux cellules en contact. Notch est une protéine transmembranaire, mais Delta aussi. Donc l'activation de la voie Notch d'une cellule est réalisée par une voisine. Chez *C. owczarzaki*, dans l'agrégat pluricellulaire, les cellules ne se touchent pas. La voie Notch est présente, mais elle est activée par des signaux de l'environnement. On voit donc que le passage successif/simultané s'est réalisé par complication d'un environnement qui intègre les autres cellules de l'organisme pluricellulaire.

Ainsi, la gastrea de Haeckel n'a jamais existé. L'ancêtre commun des métazoaires n'a jamais été «simple», car, dès l'origine, il a dû présenter une différenciation cellulaire élaborée. ■

### BIBLIOGRAPHIE

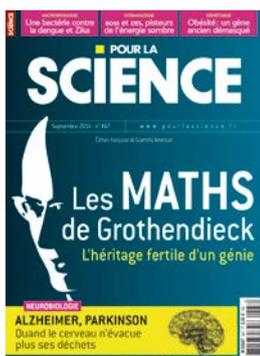
A. Sebé-Pedrós et al., **The origin of Metazoa : A unicellular perspective**, *Nature Reviews Genetics*, vol. 18, pp. 498-512, 2017.

A. Sebé-Pedrós et al., **The dynamic regulatory genome of *Capsaspora* and the origin of animal multicellularity**, *Cell*, vol. 165, pp. 1224-1237, 2016.

K. V. Mikhailov et al., **The origin of Metazoa : a transition from temporal to spatial cell differentiation**, *Bioessays*, vol. 31, pp. 758-768, 2009.

A. Owczarzak et al., **The destruction of *Schistosoma mansoni* mother sporocysts in vitro by amoebae isolated from *Biomphalaria glabrata* : An ultrastructural study**, *J. Invertebr. Pathol.*, vol. 35, pp. 26-33, 1980.

# DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS LES NUMÉROS DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION SUR [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



## L'AUTEUR



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

# DIVISER POUR MIEUX SE RÉGALER

Pour confectionner de meilleures charcuteries, on peut jouer sur la taille des divers ingrédients assemblés dans la préparation finale.

**C**hanger les produits alimentaires traditionnels semble difficile, car ils sont définis par la réglementation. Ainsi, on sait produire des boissons faites de 89 % d'eau, 10 % d'éthanol et 1 % de sucres, composés phénoliques, divers acides, éléments minéraux et composés odorants, mais ces boissons ne seront jamais du vin, puisque ce dernier est défini comme le produit de la fermentation du jus de raisin.

Pour d'autres produits, la place à l'inventivité n'est pas grande, sous peine que le produit ne soit pas reconnu comme traditionnel. Pour les charcuteries, la tradition fossilise les recettes. Pourrions-nous trouver une issue ?

Nombre de charcuteries comportent de la chair (du tissu musculaire) et de la matière grasse. Ces deux matériaux sont souvent divisés, notamment à l'aide d'un hachoir. Par exemple, dans un saucisson, de petits cubes de gras (blanc) sont dispersés dans la chair broyée (rouge), à l'intérieur d'un boyau. La question est : quelle serait la taille « optimale » de ces petits cubes ?

Pour répondre à la question, souvenons-nous que les préparations pour glace font des granités quand elles sont refroidies lentement dans le compartiment à glace d'un réfrigérateur, alors que les mêmes préparations forment de petits cristaux quand elles sont refroidies plus rapidement, à la température d'un congélateur, avec, de surcroît, une agitation du milieu. C'est comme lorsqu'on évapore de l'eau salée rapidement ou lentement : dans le premier cas, on forme de petits cristaux, mais, dans le second cas, on forme de gros cristaux. Pour les glaces comme pour l'eau salée, la cristallisation

*Tiens, voilà du boudin... Mais son goût dépend de la taille des composants réunis à l'intérieur du boyau.*



se fait autour de « germes », qui peuvent être des particules (poussière, fibres, etc.), mais quand l'agrégation des molécules d'eau peut se faire tranquillement, elle favorise l'empilement régulier en gros monocristaux.

En quoi cela est-il important ? La question du goût est essentielle bien sûr et les composés qui donnent du goût sont dans une solution surfondue entre les cristaux. Or plus les cristaux sont petits, plus la surface exposée est grande (pour un même volume de produit) et plus le goût est perçu. La division permet un accès rapide des molécules sapides ou odorantes, par exemple, aux récepteurs sensoriels de la langue.

Pour la même raison, du pistou broyé au mixeur électrique a un goût plus net, quand on le met en bouche, que le pistou fait au mortier et au pilon, où la division des ingrédients est moindre. De même, la mayonnaise a plus le goût de l'huile dont elle est faite au mixeur que quand elle est produite à la fourchette : dans le mixeur, la taille des gouttes d'huile est environ 100 fois plus petite.

En charcuterie, dans la mesure où l'on doit disperser de la matière grasse et de la chair, on obtiendra plus de goût si l'on divise finement les deux composantes, chair et matière grasse. En revanche, on risque d'avoir moins de longueur en bouche. D'où la proposition de mêler deux types de préparations : les deux composantes, chair et gras,

finement broyées, et ces deux mêmes composantes divisées grossièrement, en particules un peu plus petites que la taille des dents, puisque ces dernières sont notre « mètre étalon » pour la détermination des tailles en bouche : l'homme est la mesure de toutes choses, disait Protagoras !

Ainsi, avec la division fine, nous aurons un goût en attaque ; puis, avec la division grossière, nous aurons de la longueur en bouche. Et c'est ainsi que nous aurons des charcuteries « traditionnelles » améliorées. ■



## LA RECETTE

- ➊ Mélanger de la chair fraîche de porc (épaule, jambon, échine, poitrine, par exemple) et du gras « dur » frais (lard dorsal de porc, gras de couverture des jambons...), puis hacher la mée.
- ➋ Diviser le produit obtenu en deux parties (proportions selon votre goût).
- ➌ Passer une des moitiés au cutter, puis mélanger cette partie à la partie simplement hachée.
- ➍ Ajouter alors sel, sucre, épices, éventuellement salpêtre ou sel nitrité et laisser reposer quelques heures.
- ➎ Mettre en boyaux et entreposer dans une pièce fraîche (entre 10 et 15 °C) non ventilée.
- ➏ Éventuellement, placer quelques heures dans une pièce où la température est supérieure à 20 °C.
- ➐ Enfin, faire sécher dans un local légèrement ventilé.



EN COPRODUCTION AVEC  
**CNC**



MASTER CLASS  
Superviseur d'effets spéciaux  
25 janvier 2018 à 20h30

EXPO 17 OCTOBRE 2017 > 19 AOÛT 2018

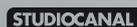
# EFFETS SPÉCIAUX

## CREVEZ L'ÉCRAN !

M PORTE DE LA VILLETTE [cite-sciences.fr](http://cite-sciences.fr)



AVEC LE SOUTIEN DE



EN PARTENARIAT AVEC

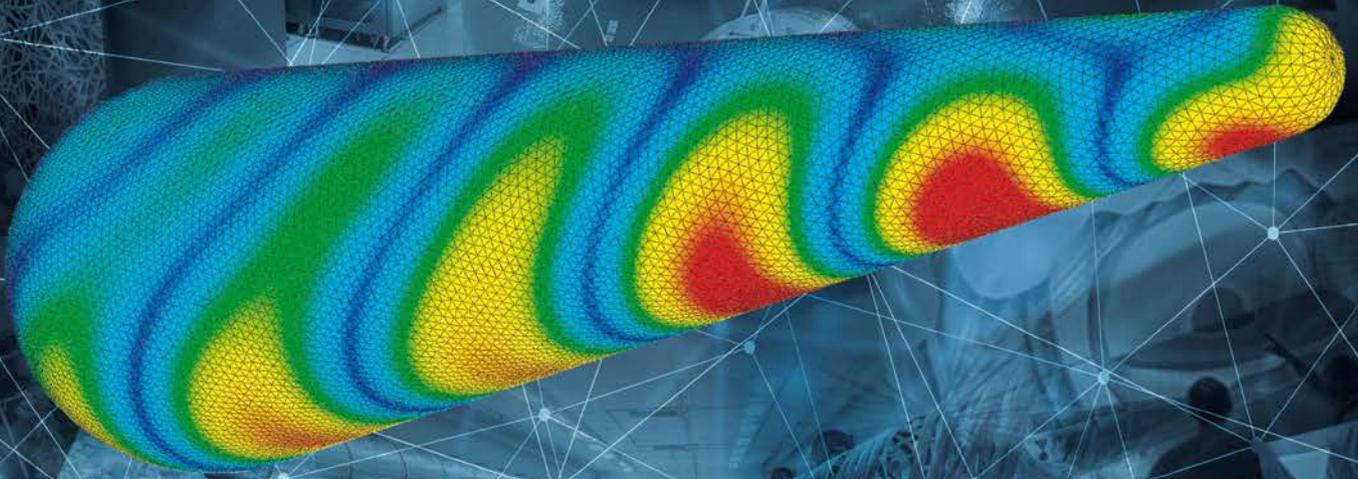


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

DIRECTION DES  
APPLICATIONS  
MILITAIRES

# 60 ans au service de la dissuasion nucléaire française



**Alternances**

**Stages**

**Thèses**

**Post-docs**

**CDI**

## Rejoignez-nous et partagez nos valeurs

**ENGAGEMENT** : s'investir au service de la dissuasion nucléaire française et agir pour la défense et la sécurité

**AMBITION** : relever des défis scientifiques et techniques avec des moyens technologiques d'exception

**INTÉGRITÉ** : faire de l'honnêteté morale et scientifique le fondement de notre action

**ACCOMPLISSEMENT** : construire son avenir et s'affirmer dans un environnement varié et respectueux

**ESPRIT D'ÉQUIPE** : associer les forces et les compétences de chacun pour atteindre l'objectif

Site : [www-dam.cea.fr](http://www-dam.cea.fr)

Offres : [www.cea.fr/emploi](http://www.cea.fr/emploi)

Contact : [drh-suivi.recrutements@cea.fr](mailto:drh-suivi.recrutements@cea.fr)