

La Recherche

LES ESSENTIELS

Numéro
anniversaire
1970-2020

50 ans

DE DÉCOUVERTES

avec Peter Higgs, Françoise Barré-Sinoussi, Donald Johanson,
Alim-Louis Benabid, Joël Doré, Michel Mayor,
Emmanuelle Charpentier, Takaaki Kajita...

D 8,60 € - BEL 7,90 € - ESP 7,60 € - GR 7,60 € - ITA 7,60 € - LUX 7,60 € - PORT CONT 7,60 € - CH 13,80 FS - TUN 7,40 TND - MAR 69 DH - CAN 10,99 \$ CAN - DOM 7,60 € - TOM SURFACE 1000 XPF - TOM AVION 1720 XPF



M 04219 - 33 - F: 6,90 € - RD


MYSTÉRIEUSE BIRMANIE

Mandalay, golfe du Bengale, temples de Bagan... il y a des noms qui font instantanément rêver. Sans même évoquer la vallée des rubis, célèbre titre de Joseph Kessel, aussi bien journaliste qu'aventurier qui raconta les richesses de Mogok, ville toute empreinte de légendes.

Le voyage proposé aujourd'hui au Myanmar par Sciences et Avenir invite à la découverte de ce pays mieux connu de beaucoup sous le nom de Birmanie, qui paraît toujours aussi mystérieux.

Parce qu'il est synonyme de pierres précieuses - aussi bien saphirs que rubis ! - de jade et autres pierres fines, il nous fallait, pour le décrypter, un spécialiste incontestable du domaine. Ce sera le cas, avec Didier Giard, membre de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer et Président de l'Association Française de Gemmologie, fin connaisseur de géopolitique, qui replacera pour nous l'importance du pays dans l'Asean (association des nations de l'Asie du sud-est) et sur les nouvelles routes de la Soie. Ce sont à la fois la découverte de sites somptueux et la compréhension du monde d'aujourd'hui qui vous sont proposées. Un merveilleux voyage en perspective.

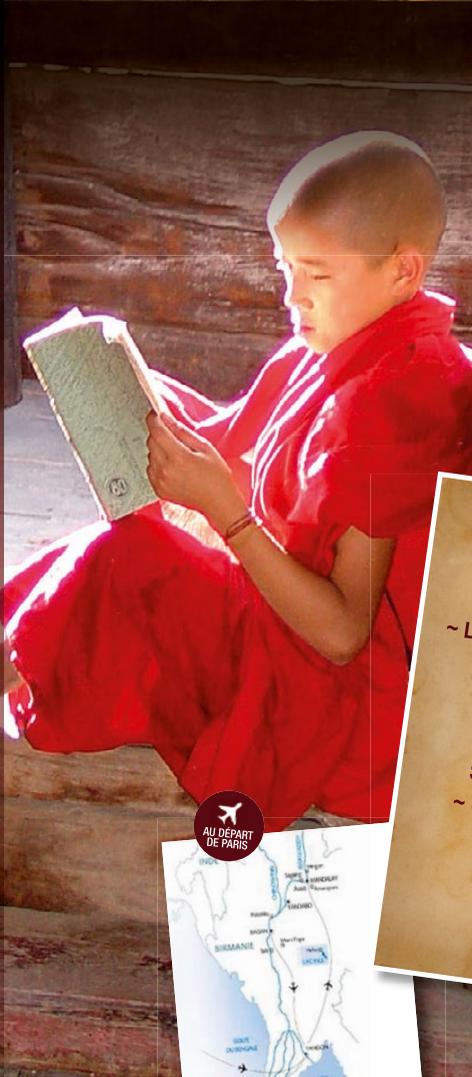


Dr Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction
de Sciences et Avenir



AVEC VOUS À BORD ! DIDIER GIARD Conférencier

Didier Giard est membre titulaire de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer où il occupe le siège de l'ancien ambassadeur André Lewin et est membre de la prestigieuse Société des Explorateurs Français créée en 1937 par Paul-Emile Victor.



LES EXPÉDITIONS

SCIENCES
ET
AVENIR

CROISIÈRE EN BIRMANIE

FESTIVAL DU
PHAUNG DAW OO
AU LAC INLE

14 JOURS / 11 NUITS
DU 14 AU 27 OCT. 2020
A BORD DU PANDAW II

LES POINTS FORTS

- ~ UN CONFÉRENCIER DE TRÈS HAUT NIVEAU SPÉCIALISTE DE LA BIRMANIE.
- ~ LES VISITES DES PLUS BEAUX SITES DE LA BIRMANIE.
- ~ UNE DES MEILLEURES PÉRIODES DE L'ANNÉE.
- ~ LE GRAND MOMENT DE VOTRE CROISIÈRE, LE FESTIVAL DES BATEAUX PAGODES SUR LE LAC INLE, C'EST L'UN DES PLUS BEAUX SPECTACLES AQUATIQUES D'ASIE DU SUD-EST.
- ~ UN PETIT PAQUEBOT CONVIVAL DE 20 CABINES POUR 40 PRIVILÉGIÉS.
- ~ UN TOUT COMPRIS BLEU VOYAGES (excursions, boissons à table, etc...).
- ~ UN ACCOMPAGNEMENT FRANCOPHONE.

À PARTIR DE

3 700 €/PERS.

Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES

213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON

TÉL. 04 72 76 75 66

www.expeditions-sciencesetavenir.fr

Bleu Voyages

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.



Crédits photos : Wikimedia / Michael Günther CC-BY-SA 4.0 - Pixabay.com



La Recherche NUMÉRO SPÉCIAL

Sophia Publications : 8, rue d'Aboukir 75002 Paris.
Tél. : 01 70 98 19 19. e-mail rédaction : courrier@larecherche.fr
Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom.
Par mail, libérez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivie du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

ABONNEMENTS

Pour toutes questions concernant votre abonnement : 01 55 56 71 15

Adresse : *La Recherche*,
4, rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex
ABONNEMENTS : Tarif France :
1 an 10 n^m + 1 n^o double 67 euros
1 an 10 n^m + 1 n^o double
+ 4 hors-séries 89 euros

Tarif international : nous contacter
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

Suisse : Edigroup - Tél. : 022 860 84 01

Belgique : Edigroup - Tél. : 070 233 304

Achat de revues et d'écrans *La Recherche* : 8 rue d'Aboukir
75002 Paris. Tél. : 01 70 98 19 24

La Recherche est publiée par Sophia Publications.

Président-directeur général
et directeur de la publication : **Claude Perdrier**
Directeur général : **Philippe Menat**
Directeur éditorial : **Maurice Szafran**
Directeur éditorial adjoint : **Guillaume Malaurie**
Directeur délégué : **Jean-Claude Rossignol**

RÉDACTION

Directrice de la rédaction : **Dominique Leglu**

Rédacteur en chef : **Philippe Pajot**

Rédacteur en chef adjoint : **Vincent Glavieux**

Conception graphique (Couverture) : **Dominique Pasquet**

Assistante : **Gabrielle Monroe** (19 06)

Chefs de rubrique : **Hervé Cabibbo** (19 30) **Gautier Cariou** (19 31)

Mathias Germain (19 33) **Sylvain Guilbaud** (19 38) **Bérénice Robert** (19 34)

Directrice artistique : **Maryvonne Marconville** (19 28)

Première secrétaire de rédaction : **Anaëlle Bruyand** (19 35)

Service photo : **Claire Balladur** (19 41)

Coordination de ce numéro : **Hervé Cabibbo**

Conception de ce numéro : **Marie-Laure Théodule**

Ont collaboré à ce numéro : **Mélissa Bouffig** (secrétariat de rédaction),

Patrick Garcia (maquette)

Responsable fabrication : **Christophe Perrusson** (19 10),

Thibault Quéré (19 21)

Activités numériques : **Bertrand Clare** (19 08)

Communication : **Joëlle Hézard** 01 58 65 09 99

Directeur des ventes et promotion :

Valéry-Sébastien Sourieau (19 11)

Vente messageries VIP - diffusion : **Frédéric Vinot**

Numéro Vert 0800 51 49 74

Responsable gestion abonnements : **Isabelle Perez** (19 12)

Responsable du marketing direct : **Linda Pain** (19 14)

Responsable administratif et financier : **Nathalie Tréhin** (19 16)

Comptabilité : **Teddy Merle** (19 15)

Diffusion librairies DIF'POP : Tél. : 01 43 62 08 07 Fax : 01 43 62 07 42

RÉGIE PUBLICITAIRE

MédiaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris

Tél. : 01 44 88 97 70. Fax : 01 44 88 97 79

e-mail : pnom@mediaobs.com

Pour joindre directement une personne, composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom.

Directrice générale : **Corinne Rougé** (93 70)

Directeur commercial : **Christian Stefani** (93 79)

Partenariats : **Karine Grossman** (89 08)

Studio/Maquette/Technique : **Cédric Aubry** (89 05)

Imprimerie Elcograf Spa (Vérone-Italie).

Dépôt légal à parution.

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0924 K 85863. ISSN 2681-4749

Photos de couverture : CERN/Maximilien Brice - Florence Durand/Sipa - Institute of Human Origins, Arizona State University - Heinz Troll/EPO - INRAE/Bertrand Nicolas - UNIGE - Peter Steffen/DPA/AFP - Naoki Maeda/AP/SIPA



Origine du papier : Autriche - Taux de fibres recyclées : 0 % -
Eutrophisation : Ptot = 0,008 kg/tonne de papier. Ce magazine
est imprimé chez Elcograf Spa (Italie), certifié PEFC.

CROIRE EN LA RECHERCHE



À la fin des années 1980, alors étudiant en physique, j'assistais à des séminaires où des chercheurs expliquaient leur projet de construire des détecteurs d'ondes gravitationnelles, ces vibrations de la trame de l'espace-temps prévues par Einstein. La tâche paraissait insurmontable : pour déceler le passage de ces ondes, il aurait fallu être capable de « voir » des déplacements de miroirs sur une distance inférieure au millième de la taille d'un proton ou d'un neutron, les particules qui constituent le noyau atomique... Je trouvais cela fascinant, mais doutais de la faisabilité de la chose. C'était sans compter sur l'ingéniosité des chercheurs et ingénieurs qui, en moins de trente ans, sont parvenus à concevoir et construire les interféromètres gravitationnels. Depuis 2015, ces bijoux technologiques ont ainsi détecté des dizaines d'ondes gravitationnelles provenant de la fusion de trous noirs et d'étoiles à neutrons. Une nouvelle fenêtre s'ouvrait sur l'Univers.

Cet exemple emblématique contient les principaux éléments de la recherche scientifique : des chercheurs passionnés et persévérants qui, à terme, bouleversent un domaine. Il montre aussi qu'il s'agit d'une activité au temps long, voire très long, qui passe par des échecs et des progrès avant d'éventuellement aboutir. L'anniversaire de notre magazine est l'occasion de revenir sur d'autres avancées fascinantes qui ont émaillé ce dernier demi-siècle, de la génétique à l'astronomie, en passant par la paléontologie et la géophysique, que nous avons suivies pour nos lecteurs. Qu'ils soient remerciés de leur fidélité. Que peut-on imaginer pour les cinquante prochaines années ? Un ordinateur quantique universel qui aurait des capacités de calcul sans commune mesure avec ce que nous connaissons aujourd'hui ? Des centrales nucléaires qui fonctionneraient sur le principe de la fusion, et donc peu émettrices de CO₂ et de déchets radioactifs ? Il faut continuer à croire en la recherche. ■

Sommaire

50 ANS DE DÉCOUVERTES Numéro spécial n° 33 mars - mai 2020

3 **ÉDITO**

6 **VERBATIM**

50 ans de succès menacés d'appauvrissement

Michel Blay

Terre
&
Univers

8

Univers

10 Moisson de molécules dans notre Galaxie

Arno A. Penzias et Pierre Encrenaz

12 **ENTRETIEN AVEC MICHEL MAYOR**

Exoplanètes, la première d'une longue série

Propos recueillis par Philippe Pajot

Arrêt sur découvertes

Pour fêter les 50 ans de notre magazine, dont le premier numéro est paru en mai 1970, nous vous invitons à voyager dans le passé, de 1970 à 2020. Au fil de cette lecture, vous vous arrêterez sur les grands événements scientifiques qui ont jalonné cette aventure. Le texte des articles est fidèle à celui publié à l'époque dans nos colonnes, sans mise à jour. La date de la découverte ou de l'avancée figure verticalement au début de chaque article ; la date de sa publication dans *La Recherche* est indiquée au moyen d'un tampon rouge. À la fin de la plupart des articles, une chronologie intitulée « Et depuis » indique les grandes avancées depuis la publication. À la fin de chaque partie, des pages « Et aussi » rappellent d'autres progrès majeurs.

16 **ENTRETIEN AVEC BRIAN SCHMIDT**

Et pourtant, l'expansion de l'Univers s'accélère...

Propos recueillis par Denis Delbecq

20 Le choc des ondes gravitationnelles

Sylvain Guillbaud

23 **PHOTO**

Première image d'un trou noir

24 **ET AUSSI...**

26

Terre

26 Le séisme de la tectonique des plaques

Jacques-Olivier Baruch

29 Réchauffement climatique à la une

Lise Barnéoud

31 **ET AUSSI...**

Homme
&
Vivant

32

Biologie

34 Naissance du génie génétique

Sandrine Étien

36 **ENTRETIEN AVEC FRANÇOISE BARRÉ-SINOUSI**

Le virus du sida enfin détecté

Propos recueillis par Sophie Coisne

39 **ENTRETIEN AVEC JOËL DORÉ**

L'intestin dévoile son microbiote

Propos recueillis par Marine Cygler

40 La modification de l'ADN à la portée de tous

Jean-Philippe Braly

44 **ET AUSSI...**

46 Paléontologie

- 46 **ENTRETIEN AVEC DONALD JOHANSON**
Lucy change le cours de l'histoire
Propos recueillis par Paul Bahn
- 50 **PHOTO**
Les chefs-d'œuvre révélés de la grotte Chauvet
- 51 Toumaï questionne les origines de l'homme
Bernard Wood
- 54 On a tous un peu de Neandertal
Nicolas Constans
- 57 Homo sapiens vieillit de 100 000 ans
Thibault Paris
- 60 **ET AUSSI...**

62 Neurosciences

- 62 **ENTRETIEN AVEC ALIM-LOUIS BENABID**
Stimuler les neurones pour adoucir la maladie de Parkinson
Propos recueillis Mathias Germain
- 66 **ENTRETIEN AVEC JEAN-PIERRE CHANGEUX**
L'émergence d'une science unifiée de l'esprit
Propos recueillis par Marie-Laure Théodule
- 68 L'optogénétique en pleine lumière
Pascaline Minet
- 70 **ET AUSSI...**

www.larecherche.fr

RECHERCHER

■ Les archives du magazine
Les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles.

S'INFORMER

■ L'actualité de la recherche
Retrouvez les chroniques et l'agenda des manifestations.

ACHETER

■ Abonnement et vente d'anciens numéros
■ Livres sélectionnés par *La Recherche*
Les outils du chercheur.



La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies.
<http://twitter.com/maglarecherche>

OFFRE D'ABONNEMENT P. 85

Maths & Matière

72 Physique

- 74 La supraconductivité change de température
Karl Alexander Müller et Johannes Georg Bednorz
- 78 **ENTRETIEN AVEC ALBERT FERT**
Et l'électronique devint grand public
Propos recueillis par Jacques-Olivier Baruch
- 80 **ENTRETIEN AVEC TAKAAKI KAJITA**
Les neutrinos ont bien une masse
Propos recueillis par Sylvain Guilbaud
- 86 La téléportation d'atomes, une première!
Nicolas Constans
- 88 Le graphène, matériau révolutionnaire
Franck Daninos
- 92 **ENTRETIEN AVEC PETER HIGGS**
Ce boson de Higgs si attendu
Propos recueillis par Olivier Dessibourg
- 96 **ET AUSSI...**

97 Maths • Informatique

- 97 **ENTRETIEN AVEC HENRI DARMON**
De la conjecture de Fermat au théorème
Propos recueillis par Philippe Pajot
- 100 L'algorithme de Shor, clé du calcul quantique
Sophie Laplante
- 101 **PHOTO**
L'art abstrait du réseau
- 102 La conjecture de Poincaré démontrée
Gérard Besson
- 106 **ET AUSSI...**

50 ANS DE SUCCÈS MENACÉS D'APPAUVRISSSEMENT



Depuis cinquante ans, le magazine *La Recherche* offre avec bienveillance ses pages aux chercheurs de toutes les disciplines afin qu'ils puissent transmettre au

plus large public les résultats de leurs travaux. N'hésitons donc pas, pour cet anniversaire, à remercier cette importante revue pour son rôle dans la diffusion des connaissances.

À l'issue de ces cinquante dernières années, on ne peut que constater les succès liés au déploiement des grands cadres théoriques mis en place dans les premières décennies du XX^e siècle. Ces années, cependant, ont-elles été marquées par des transformations radicales des contenus de connaissances, par une nouvelle saisie des objets du monde? Je ne le pense pas.

Quelques exemples, sans volonté d'exhaustivité, en portent témoignage. En mécanique quantique, le célèbre paradoxe exprimé sous la forme d'une expérience de pensée par Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) se précise avec la formulation des inégalités de Bell et trouve une réponse dans le cadre des belles expériences menées à la fin des années 1970 par Alain Aspect. Des expériences qui ouvrent la voie à l'introduction du concept d'intrication et au développement à venir de l'informatique quantique (lire p. 100). De façon générale, l'apport de la mécanique quantique à la compréhension de nombreux phénomènes macroscopiques en fait une théorie quasiment du quotidien – radioactivité, résistivité électrique, photopiles, etc.

On notera cependant, à la convergence de plusieurs disciplines classiques, sans lien immédiat avec la mécanique quantique, l'apparition de la fameuse « matière molle » de Pierre-Gilles de Gennes au début des années 1970. En outre, la théorie de la relativité générale construite par Albert Einstein dans le premier quart du XX^e siècle a connu une éclatante confirmation lors de



MICHEL BLAY est président du Comité pour l'histoire du CNRS.

1948 Il naît à Paris.

1972 Il enseigne les sciences physiques au lycée.

1980 Il passe son doctorat de troisième cycle en histoire et philosophie des sciences.

1983 Il devient chargé de recherche au CNRS.

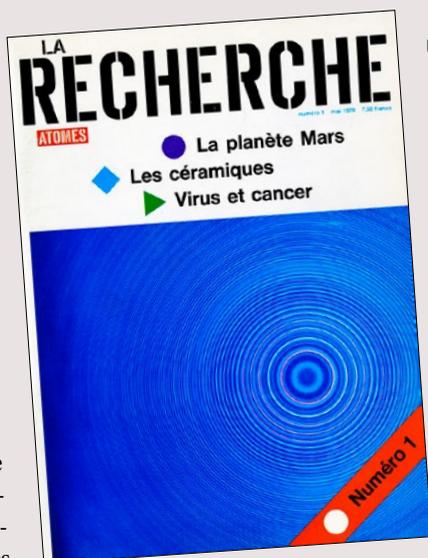
1989 Il obtient son doctorat d'État en lettres et sciences humaines.

la récente détection expérimentale des ondes gravitationnelles (le projet franco-italien Virgo et l'américain Ligo, lire p. 20). Ce sont des résultats dont on ne peut nier l'importance et les retombées technologiques, sans être pour autant les fruits de nouveaux cadres théoriques, d'un renouvellement radical des concepts, comme cela avait été le cas au début du XX^e siècle avec ceux de temps, d'espace, d'objet et de continuité. De même, la détection des leptons et celle du boson de Peter Higgs en 2012 (lire p. 92) s'inscrivent dans le cadre de la théorie des particules et de l'amélioration des détecteurs jusqu'à la construction du grand collisionneur du Cern.

La biologie moléculaire prend forme dès les années 1950 par la convergence de la biochimie et de la génétique (lire p. 34), une convergence redoublée par celle qui a été opérée entre la génétique et la biologie évolutive, conduisant à la synthèse contemporaine de la « théorie synthétique de l'évolution » ouverte sur l'avenir.

Une nouvelle orientation concernant l'ensemble des domaines s'est fait jour au cours des dernières décennies à travers l'importance

dévolue au numérique et aux procédures algorithmiques. La puissance du calcul et des codes rend possibles des modélisations et des simulations inenvisageables avant. Ainsi en est-il, par exemple, de la « résolution » numérique du célèbre problème des trois corps (à N corps), ou de la modélisation dans les études sur le climat. Les cadres théoriques ne sont pas nouveaux et les avancées ne sont pas le fruit de changements conceptuels décisifs, mais de la puissance du calcul. Il convient donc de ne pas confondre théorie, modélisation et simulation. Le numérique a modifié le statut du démonstratif. Ce dernier n'est ni du calculé ni du corrélé. Il importe donc d'être attentif à distinguer les régimes différents de la certitude qui sont omniprésents et parfois confus dans la présentation des résultats. Lorsqu'un phénomène est parfaitement décrit par une théorie, la configuration est optimale, car la déduction, à partir de la théorie, des propositions décrivant le phénomène est aussi rigoureuse et stricte que possible; en revanche la modélisation et, a fortiori, la simulation sont des méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir des prédictions fort intéressantes mais qui, en aucun cas, ne peuvent prétendre ni à la totale précision, ni à la certitude et encore moins à la valeur explicative. Tout cela pour rappeler qu'avant de porter un jugement sur la science et ses résultats, il convient de savoir quelle démarche a été mise en œuvre et pour quelles raisons. On évitera par là même des polémiques inutiles en confondant les régimes de certitude. En outre, le recours au numérique dans le travail scientifique n'est pas sans conséquence sur son sens et sur ses enjeux. La pratique calculatoire trop systématique induit une orientation de la recherche depuis deux décennies vers des projets à court terme de style parfois socio-économique plutôt que vers des recherches plus théoriques, libres et non programmées. Ce qui ferme en partie la voie à l'approfondissement conceptuel, à la véritable possibilité d'un renouveau des champs théoriques. N'est-ce pas précisément par une réflexion au long cours sur ce qui fait, à première vue, la cohérence d'un champ théorique que peut surgir l'écart conceptuel qui conduit à tout reconstruire? On ne programme pas le renouveau théorique: ce n'est pas en lançant un appel d'offres relatif à des études sur la bougie qu'on a découvert le laser, mais, au



▲ En mai 1970 paraissait le premier numéro de La Recherche. En cinquante ans, le travail scientifique a connu nombre de bouleversements, notamment avec l'introduction du numérique.

contraire, en construisant, indépendamment d'objectifs fixés, le nouveau champ théorique de la mécanique quantique.

Dans cette perspective, on peut également s'interroger sur l'évolution de la recherche. On observe un glissement de l'intérêt porté à la recherche libre et non dirigée vers des recherches sur programmes visant à l'obtention de résultats rapides pour un profit économique lui aussi rapide. Sans la durée et la liberté, nous n'aurions pas les importants résultats de Serge Haroche ou d'Albert Fert. La politique de la recherche centrée sur le projet conduit à un dépérissement considérable de la vie des laboratoires, du goût pour la connaissance et pour la collaboration, au profit d'une compétition de tous contre tous. Il s'ensuit une course éperdue dévorant tout le temps en rédaction de dossiers pour l'obtention de crédits ou pour la création de start-up, de telle sorte que sont produites des études trop rapides, parfois bricolées jusqu'à des résultats trafiqués.

UNE COURSE AUX RÉSULTATS

Au cours de ces cinquante dernières années, si la pratique de la recherche s'est poursuivie d'abord en respectant un mode de travail qui reconnaissait l'importance du temps de la réflexion et ménageait l'espace d'une nécessaire liberté, depuis la fin du XX^e siècle, les enjeux de connaissance ont été en partie remplacés par une course aux résultats rapides, sans perspective sur le long terme et sans réflexion éthique sur le sens de ces résultats pour l'homme (en particulier les outils d'édition du génome CRISPR-Cas9 et les neurosciences cognitives). De cela témoignent aussi les politiques successives de restriction budgétaire, de recrutement par multiplication des CDD conduisant à une perte grave des savoir-faire dans les laboratoires. Seule une politique ambitieuse et volontaire permettra un redressement de la recherche en France; une vraie politique, sans faux-semblants, misant sur l'avenir, comme furent celles conduisant à la recréation du CNRS en 1945, à l'impulsion gaulliste de 1958-1960, et aux Assises de la recherche des années 1980. La France de la connaissance n'est-elle donc plus portouse d'avenir pour nos dirigeants? 

Propos recueillis par
Marie-Laure Théodule

Terre

De la détection des molécules interstellaires à celle des ondes gravitationnelles, en passant par la première exoplanète, sans oublier l'accélération de l'expansion de l'Univers : la moisson est féconde en astrophysique, alors que, sur Terre, se confirment la tectonique des plaques et le changement climatique.

Univers

Univers

Moisson de molécules dans notre Galaxie	10
Exoplanètes, la première d'une longue série	12
Et pourtant, l'expansion de l'Univers s'accélère...	16
Le choc des ondes gravitationnelles	20
Première image d'un trou noir	23
Et aussi...	24

'S

Terre

Le séisme de la tectonique des plaques	26
Réchauffement climatique à la une	29
Et aussi...	31

MOISSON DE MOLÉCULES DANS NOTRE GALAXIE

Alors que la première molécule contenant du carbone a été repérée dans le milieu interstellaire dès 1937, le début des années 1970 marque, lui, la détection des premières molécules organiques complexes, les briques du vivant!



Arno A. Penzias, physicien, et Pierre Encrenaz, astronome



▲ La nébuleuse d'Orion, cocon de gaz entourant des étoiles chaudes, est propice à la détection de molécules interstellaires.

La découverte, en 1969, dans toute la Galaxie, du formaldéhyde H_2CO , avec une abondance comparable à celle de OH , changea la vision que l'on avait du milieu interstellaire. Quelques mois plus tard, on observa même le formaldéhyde en absorption sur le fond continu du ciel, ce qui suppose qu'il est à une température inférieure à 3 kelvins, température du rayonnement universel. Ce problème d'anti-inversion du formaldéhyde – l'absorption observée montrant que le formaldéhyde est plus froid que le milieu qui l'entoure – n'est pas encore résolu.

La découverte du formaldéhyde H_2CO , molécule très fragile, contenant deux atomes lourds, prouva donc que l'image du milieu interstellaire admise auparavant était erronée: elle montrait en effet que la complexité des réactions chimiques qui peuvent s'y produire est bien plus grande que celle que l'on aurait pu déduire des seules identifications de OH , H_2O et NH_3 . L'une des explications de cette erreur est due au domaine peu étendu en fréquence que l'équipement radioastronomique disponible en 1968 permettait d'explorer.

Seules les molécules dont les transitions tombent dans le domaine de fréquence observable avaient des chances d'être détectées, ce qui excluait toutes les molécules détectées depuis lors. Cependant, le formaldéhyde aurait déjà pu l'être puisqu'une petite interaction dans cette molécule dédouble le niveau fondamental d'une paire de niveaux séparés par 150 000 MHz (donc inobservable alors), et le dédoublement fait apparaître une transition à 4630 MHz tout à fait observable en 1968 avec l'équipement existant. Une étude plus systématique des molécules commença lorsqu'un

récepteur spectral de type classique, mais dont les performances ont été améliorées par l'emploi de composants électroniques de très haute qualité, permettant des mesures jusqu'à 150 000 MHz, fut construit par les laboratoires américains Bell Telephone. Ce récepteur, encore unique au monde, permet de multiplier par cinq le domaine spectral accessible par la radioastronomie. Il fut utilisé pour la première fois au printemps 1970, au foyer du télescope de 36 pieds à Kitt Peak, en Arizona. Pendant la première année d'utilisation, plus d'une douzaine de molécules ont été détectées grâce à lui. En dix jours d'expériences seulement, en avril 1971, deux groupes de scientifiques ont découvert pas moins de six molécules!

RAYONNEMENT RADIO

La plupart de ces molécules, en particulier les plus complexes, n'ont été observées que dans la direction du centre galactique, mais d'autres, telles que CO, HCN, CS et H₂CO, sont réparties dans toute la Galaxie. Elles sont le plus souvent observées près d'étoiles chaudes qui élèvent la température du gaz les entourant et permettent ainsi d'exciter les transitions observées dans les molécules interstellaires. Un exemple d'une telle région est la nébuleuse d'Orion, que l'on peut observer à l'aide de jumelles et qui apparaît comme un cocon de gaz entourant des étoiles chaudes.

Mais la plus grande partie du ciel, d'ailleurs plus difficile à observer parce qu'il n'y a pas d'excitation forte, est recouverte par des nuages sombres. Leur présence fut détectée par les opticiens dès le XVIII^e siècle; ils notèrent qu'en de nombreux endroits, les étoiles étaient fortement obscurcies ou complètement invisibles. Comme il n'y a aucune raison pour que des régions étendues du ciel soient vides d'étoiles, ils pensèrent qu'entre les étoiles et nous devaient se trouver des nuages de poussière et de gaz froids (essentiellement sous forme d'hydrogène moléculaire), mais seule la radioastronomie permit leur étude directe, puisque, du fait de la basse température, ils n'émettent presque pas de rayonnement optique, mais surtout un rayonnement radio. Ces nuages contiennent H₂, OH, H, CO, ainsi que de grandes quantités de monoxyde de carbone CO; ils perdent donc peu à peu leur mystère.

L'abondance des molécules semble indépendante à première vue de leur complexité. En effet, en se fondant sur une abondance H/OH de 10⁷, on

Et depuis ● ● ●

● — **1984**
Le modèle des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) permet d'expliquer les raies des poussières du milieu interstellaire.

● — **2010**
Détection des premières PAH, les fullerènes (C₆₀ et C₇₀) dans une nébuleuse planétaire.

● — **2019**
Détection de l'hydrure d'hélium, la première molécule formée dans l'Univers.

ARNO A. PENZIAS est un physicien américain qui a travaillé aux laboratoires Bell Telephone à partir de 1963. Avec son collègue Robert Wilson, il a mis en évidence le fond diffus cosmologique, une découverte qui leur valut le prix Nobel de physique en 1978.

PIERRE ENCRENAZ est astrophysicien à l'Observatoire de Paris et professeur émérite à l'université Paris-VI.

aurait pu s'attendre à ce que CN/HCN soit de l'ordre de 10⁷; or ce rapport vaut 10⁻¹. Mais il y a une discrimination chimique évidente dans les molécules trouvées: presque toutes les molécules qui contiennent plus d'un atome lourd contiennent aussi un atome de carbone, et certaines sont très complexes, HCONH₂ ou CH₃C₂H, par exemple. Seul SiO, extrêmement peu abondant, fait exception. De plus, la molécule simple SO n'est pas assez abondante pour être détectée, alors que OCS, lui, a été trouvé.

Pendant des décennies, on a considéré le milieu interstellaire comme un gaz ténu d'atomes subissant rarement des collisions. Ces conditions sont comparables à celles utilisées en physique expérimentale. Mais ces collisions ne peuvent former de molécules stables que si les trajectoires se rencontrent exactement; sinon le moment angulaire restant lorsque les trajectoires ne se rencontrent pas tout à fait est capable d'empêcher la formation des molécules. La découverte de molécules ayant quatre atomes lourds nous incline à comparer le milieu interstellaire à celui recréé dans les laboratoires, où des réactions complexes se produisent en présence de catalyseurs.

Les éléments H, C, O, N sont présents dans le milieu interstellaire, et l'on y trouve certaines molécules organiques qui semblent être le premier maillon d'une chimie organique analogue à celle que construisit Berthelot à partir de C et H₂ dans son « œuf électrique ». Ces expériences ont été reprises par Urey, Sagan et Miller, qui ont essayé de simuler en laboratoire la composition d'une atmosphère primitive. Une décharge électrique dans un mélange de CH₄ (méthane), NH₃ (ammoniac), H₂O (eau), et H₂ (hydrogène moléculaire) conduisit à la formation de HCN, NH₃, CN, H₂CO, CH₃, CHO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, ainsi que de beaucoup d'autres molécules plus complexes: sucres, acides aminés, et chaînes aromatiques. Ces molécules organiques fragiles existent dans le milieu interstellaire qui leur est pourtant fortement hostile. Les dernières expériences semblent indiquer que l'étape difficile en direction de la vie, la synthèse des premiers acides aminés, a pu se produire même dans une atmosphère planétaire turbulente. En effet, lors de la formation de notre planète, il y a 4,6 milliards d'années, le vent solaire était extrêmement violent. Toutefois, le problème de l'apparition de la vie sur la Terre ou dans le milieu interstellaire reste entier. ■

ENTRETIEN AVEC **MICHEL MAYOR**

EXOPLANÈTES, LA PREMIÈRE D'UNE LONGUE SÉRIE

En 1995, l'astrophysicien suisse Michel Mayor observait, avec Didier Queloz, la première planète extrasolaire. Vingt ans plus tard, il est revenu sur cette découverte qui a révolutionné l'astrophysique et qui leur vaudra le prix Nobel de physique en 2019.

Propos recueillis par **Philippe Pajot**

La Recherche Votre découverte de la première planète en dehors du Système solaire a vingt ans. Depuis, l'excitation n'est pas retombée. Comment l'expliquez-vous ?

Michel Mayor En deux décennies, la quête d'exoplanètes est même devenue un pan majeur de l'astrophysique. Près de 2000 exoplanètes ont été répertoriées à ce jour et les découvertes se poursuivent. Si l'on regarde les plans stratégiques des grands observatoires du monde, tous mettent en avant les exoplanètes. C'est quelque chose qu'on ne pouvait pas deviner en 1995. Trois ans auparavant, l'annonce de l'existence de planètes autour de pulsars, étoiles très denses, n'avait pas suscité un engouement particulier. Mais lorsque, avec Didier Queloz, nous avons fait savoir que nous tenions une première planète autour d'une étoile classique, une étoile de la séquence principale (*), l'excitation a été énorme.

Les études mentionnent l'existence possible de milliards de planètes dans notre Galaxie. Combien d'entre elles seraient « habitables », avec des conditions favorables à l'émergence de la vie ?

On ne peut pas donner de chiffre précis, mais nul doute qu'il y en a des quantités colossales. Des planètes analogues à la Terre, de petite masse et tournant autour de leur étoile en un an environ, ne peuvent pas être repérées : les méthodes de détection n'ont pas encore la sensibilité nécessaire pour le faire. Les extrapolations statistiques sont donc un peu hardies. En revanche, les observations de planètes autour d'étoiles plus petites et

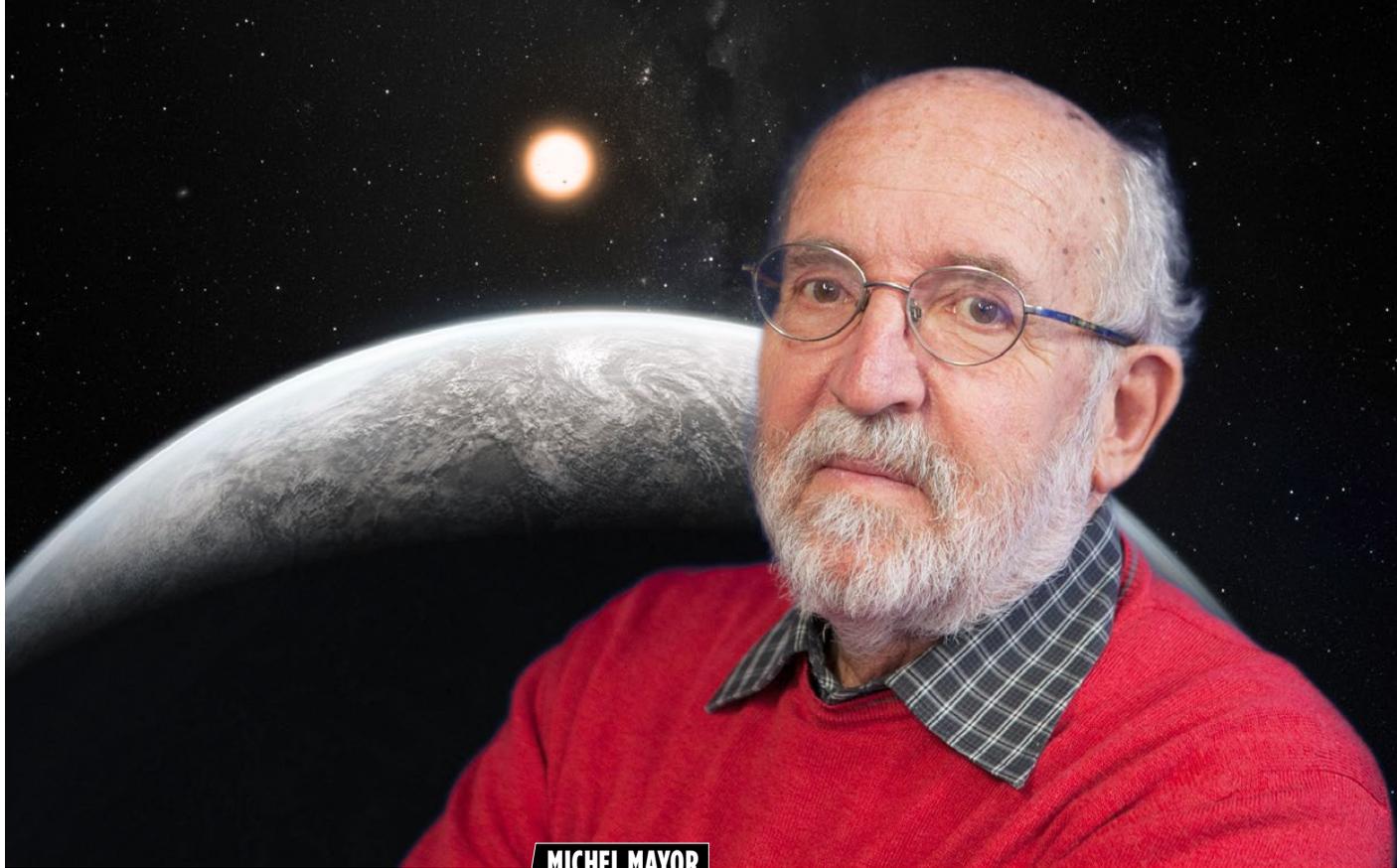
moins chaudes que le Soleil sont nombreuses. Du coup, les estimations sont plus fiables : plusieurs dizaines de pour cent de ces étoiles auraient des planètes habitables. Enfin, les modèles théoriques de formation planétaire indiquent que les planètes de petite masse se forment en pagaille. Quand on rapporte cela au nombre d'étoiles de la Galaxie, on arrive potentiellement à des milliards de planètes dont les conditions seraient favorables à la vie.

Peut-on dresser un portrait-robot d'un système planétaire de notre Galaxie ?

Pas vraiment, car la diversité des systèmes planétaires est énorme : ce ne sont pas des reproductions fidèles de notre Système solaire. On trouve des planètes-océans, des planètes rocheuses – comme la Terre ou Mars –, des systèmes avec beaucoup de planètes (systèmes multiples), des planètes gazeuses parfois très proches de leur étoile... La plus proche de son étoile que l'on connaisse aujourd'hui tourne autour en un peu plus de quatre heures ! Par comparaison, Mercure, la plus proche planète du Soleil, est sur une orbite de 88 jours. On a même repéré des planètes en orbite autour de deux étoiles. Et cet inventaire n'est pas terminé, car on trouve presque chaque semaine un nouveau système plus étonnant que le précédent. À mesure de ces découvertes, on se rend compte de la complexité de la physique de l'intérieur des planètes. Les astronomes ont un nouveau terrain de jeu que l'on n'imaginait pas.

Vous avez découvert en 1995 la première planète extrasolaire, baptisée 51 Peg b.

Publié dans
LA RECHERCHE
N° 504
Octobre
2015



MICHEL MAYOR

Comment vous y êtes-vous pris ?

Les planètes extrasolaires sont tellement lointaines qu'on ne peut pas les voir directement. D'où l'idée d'utiliser un phénomène gravitationnel : quand une planète tourne autour d'une étoile, elle la fait faiblement osciller. Par exemple, une planète de la taille de Jupiter en orbite autour du Soleil fait bouger ce dernier jusqu'à des vitesses d'une dizaine de mètres par seconde. Si vous avez un instrument capable de repérer ce mouvement, vous pouvez déduire la présence de la planète. Or, dès 1977, nous avons construit avec mon collègue André Baranne, ingénieur opticien à Marseille, un tel instrument : un spectrographe. En analysant la lumière des étoiles, cet appareil mesure à l'aide de l'effet Doppler (*) leur vitesse d'approche ou d'éloignement dans la direction de la ligne de visée. Autrement dit, il mesure la vitesse radiale. À l'époque, notre spectrographe, installé à l'Observatoire de Haute-Provence, mesurait des vitesses avec une précision de 300 mètres par seconde. Il nous a permis notamment d'étudier la vitesse des étoiles dans les amas globulaires.

Cet instrument permettait-il de déceler des planètes ?

Non, il n'avait aucune prétention de cet ordre, car il n'était pas assez sensible. Mais, à la fin des années 1980, le directeur de l'observatoire, qui avait besoin d'instrumentation pour les nuits où la lumière de la Lune gênait l'observation des

galaxies, nous a demandé un nouveau spectrographe. En vingt ans, la technique avait considérablement évolué, de sorte que nous pouvions mesurer des vitesses aussi petites que 10 mètres par seconde. Avec un tel gain, on pouvait tenter la recherche d'exoplanètes. En juin 1993, nous avons installé ce nouvel instrument au foyer du télescope de 1,93 mètre de diamètre de l'Observatoire de Haute-Provence.

Quelle a été votre stratégie de mesure ?

En se fondant sur des études théoriques, nos prédécesseurs pensaient que les exoplanètes géantes devaient avoir des périodes orbitales d'au moins plusieurs années. Pour déceler cette périodicité, il fallait donc des mesures espacées sur des temps très longs. À l'époque, de telles recherches avaient toutes été négatives. De notre côté, comme nous cherchions des objets inconnus, sans a priori, nous n'avions aucune idée ●●

Haute-Provence, à l'aide du spectrographe Elodie.

1998 Il devient professeur d'astronomie à l'université de Genève et dirige l'Observatoire de Genève.

2019 Il reçoit, avec l'astronome Didier Queloz, le prix Nobel de physique pour leur découverte de 51 Peg b.

(*) **La séquence principale** est la période d'évolution des étoiles normales : elle commence quand la réaction de fusion nucléaire de l'hydrogène débute au sein des étoiles et se termine à l'épuisement de ce combustible.

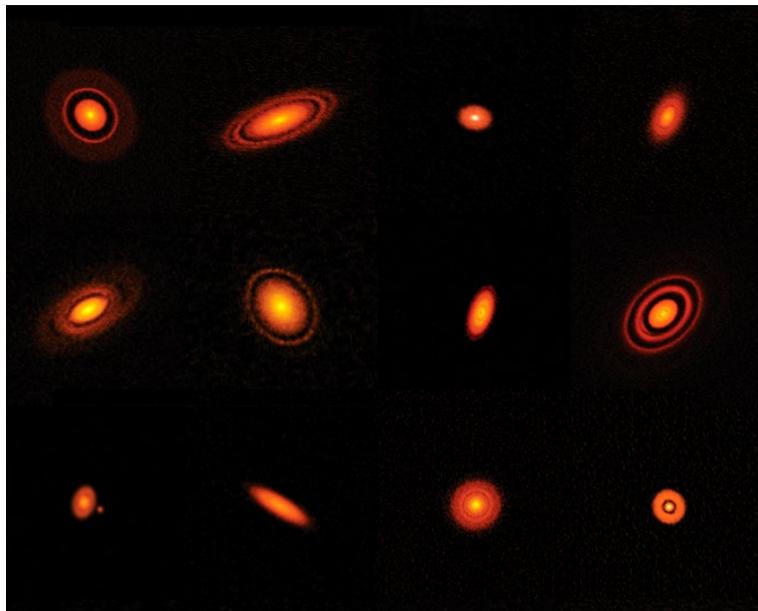
(*) **L'effet Doppler** est le décalage en fréquence de l'émission d'une source (sonore ou lumineuse). La mesure du décalage indique la vitesse radiale de la source.

••• de la masse et de la période orbitale que pouvaient avoir ces astres. Aussi avons-nous adopté une stratégie de mesure large qui permettait de découvrir des objets de n'importe quelle période, aussi bien des planètes géantes que des naines brunes, sortes d'étoiles naines, dont on ne connaissait pas non plus les caractéristiques. Cette stratégie a été à notre avantage car, d'une part, nous explorions un grand échantillon d'étoiles autour desquelles pouvaient se trouver des planètes en orbite et, d'autre part, nos mesures étaient relativement fréquentes : nous pouvions observer une étoile quasiment en continu pendant une semaine tous les deux mois. C'est cela qui nous a permis de trouver 51 Peg b, une planète gazeuse géante (de la moitié de la masse de Jupiter) qui tourne autour de son étoile en quatre jours seulement. 51 Peg b est l'archétype des planètes que l'on a trouvées ensuite en abondance, baptisées Jupiter chauds, car elles sont très proches de leur étoile et donc chauffées fortement par cette dernière.

Que nous a appris cette première planète extrasolaire ?

Elle a d'abord apporté la preuve de l'existence de telles planètes. Elle a également permis de mettre en évidence ce mécanisme majeur de formation des systèmes planétaires qu'est la migration orbitale. Les planètes naissent dans une nébuleuse constituée de gaz, de grains de glace et de poussières. Pour former une planète gazeuse, il faut

▼ *Au sein de ces disques protoplanétaires, observés grâce au télescope Alma, se forment des exoplanètes.*



que des grains de glace et de gaz s'accumulent. Or, près de l'étoile, ces grains de glace et le gaz sont fondus et chassés par le chauffage de l'étoile. Du coup, près de l'étoile, il ne reste que des poussières – silicates et fer – mais en trop faible quantité pour former de grosses planètes. Autrement dit, dans la nébuleuse, jusqu'à une distance de l'étoile d'environ 150 millions de kilomètres, il y a une zone nettoyée de glace et de gaz. Dès lors, comment expliquer que l'on observe des Jupiter chauds, de grosses planètes proches de leur étoile, puisqu'elles n'ont pas pu se former là ? On imagine que les planètes gazeuses sont nées dans la nébuleuse, loin de l'étoile, et se sont ensuite rapprochées. Cette « migration orbitale » serait ainsi un phénomène courant – on trouve beaucoup de Jupiter chauds –, mais dont on ne connaît pas encore toutes les subtilités.

Existe-t-il d'autres méthodes de détection ?

Oui. La mesure des vitesses radiales a certes permis de belles découvertes, mais une autre méthode est maintenant très utilisée : les transits planétaires. Un transit est le passage d'une planète devant son étoile, comme une éclipse, d'où résulte une baisse périodique de la luminosité de l'étoile. Dès 1999, une première exoplanète était découverte par cette méthode et, depuis, le satellite Kepler de la Nasa scrute les étoiles à la recherche de transits : à lui seul, il a ainsi découvert plus de 1 000 exoplanètes. Toutefois, la méthode des transits permet de connaître la taille d'une planète, mais pas sa masse. Or, pour confirmer l'existence d'une planète et surtout avoir des indications sur sa nature, il faut ces deux paramètres à la fois, afin d'en déduire la densité. C'est à cette condition que l'on peut savoir si la planète est rocheuse ou gazeuse. Kepler a ainsi décelé des milliers de candidats planètes qui n'ont pas tous été confirmés, car bon nombre concernaient des étoiles trop peu lumineuses pour que l'on puisse trouver leur masse par vitesse radiale. D'autres méthodes sont en train d'émerger. Par exemple, des astrophysiciens américains sont parvenus à mesurer la masse d'une exoplanète aussi légère que Mars, mais très proche de son étoile, en analysant les temps de transit dans un système multiple (1). On commence aussi à faire des images de quelques exoplanètes (2).

Quels instruments traquent les exoplanètes actuellement ?

Outre Kepler, il existe des spectrographes capables de déceler si une étoile s'approche ou

s'éloigne de nous périodiquement de 30 centimètres par seconde, soit 1 km/h. Ce gain de précision d'un facteur 1 000 en trente ans est assez fantastique. Avec des collègues français, nous avons installé il y a douze ans un tel spectrographe, baptisé Harps, au foyer du télescope européen de 3,6 mètres de diamètre de l'Observatoire européen austral (ESO) à la Silla, au Chili. Puis, en collaboration avec des astronomes d'Écosse et de Harvard, aux États-Unis, nous avons construit un second exemplaire de Harps, en place depuis trois ans dans l'hémisphère Nord, sur le télescope italien de 3,58 mètres de diamètre de La Palma, aux Canaries. Ce sont actuellement les spectrographes les plus précis au monde. On peut détecter des planètes de type terrestre, ou un peu plus massives que la Terre. Sur les 19 planètes de masse inférieure à 25 masses terrestres découvertes (ce qu'on appelle des « superterres »), 15 l'ont été par les instruments Harps. L'un des derniers résultats obtenus à l'aide de Harps Nord concerne la détection d'un système planétaire baptisé HD 219134, à seulement 21 années-lumière de nous. Il comporte une planète géante lointaine et trois superterres, dont une qui transite près de son étoile (3). Un système dont la proximité va permettre une étude plus poussée pour nous aider à mieux comprendre la formation planétaire.

De nombreuses missions sont prévues pour dénicher encore plus d'exoplanètes...

Effectivement, trois satellites sont en cours d'élaboration. La mission TESS de la Nasa est un petit satellite qui va étudier les étoiles brillantes et proches pour y chercher des transits. Cheops, petit satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA), est prévu pour la fin 2019. Il scrutera des étoiles dont on sait qu'elles possèdent des planètes découvertes par vitesse radiale pour voir si certaines sont en transit. Enfin, Plato est une mission « de luxe » de l'ESA, dont la mise en service est prévue en 2024. Ce satellite va explorer la moitié de la voûte céleste pour y rechercher des baisses périodiques de la luminosité des étoiles, mais aussi pour étudier les oscillations propres des étoiles, ce qu'on appelle l'astérosismologie, qui donne des informations sur la structure des étoiles. Surtout, Plato pourra trouver des planètes de la masse de la Terre dans la zone d'habitabilité d'étoiles de type solaire, la zone où l'eau peut être liquide. Une capacité que n'auront ni TESS ni Cheops. Et les petites planètes ainsi découvertes pourront être suivies du sol en vitesse radiale.

Avec quels instruments se fera le suivi des planètes qui seront découvertes ?

À l'aide des deux spectrographes Harps, mais les astronomes planchent aussi sur une version « de luxe ». Un télescope de 3,6 mètres avec un spectromètre de type Harps n'étant pas toujours suffisant pour étudier les étoiles faibles – on ne recueille pas assez de photons –, le projet Espresso en cours de construction par des collègues européens vise à pallier ce manque. Dans sa philosophie, il s'agit toujours du même type de mesure – mesure de vitesse radiale par effet Doppler –, mais ce sera le nec plus ultra technologique, un instrument de sept tonnes, sous vide, alimenté par des fibres optiques avec des tas de ruses pour le stabiliser en température. Dès 2017, il recevra la lumière d'un télescope de 8 mètres du Very Large Telescope de l'ESO, sur le mont Paranal, au Chili. L'objectif est de mesurer une vitesse radiale des étoiles inférieure à 0,1 mètre par seconde, ce qui est l'ordre de grandeur du mouvement que la révolution de la Terre imprime au Soleil.

On devrait donc détecter des planètes semblables à la Terre ?

Trouver une planète rocheuse à une distance telle de son étoile que de l'eau liquide puisse exister à sa surface, on en trouvera à coup sûr d'ici quelques années. En tout cas avec la mission Plato, et même avec la méthode des vitesses radiales, je suis assez confiant. Le problème, c'est de faire de la spectroscopie de l'atmosphère de ce type d'objet pour vérifier si on y trouve des signatures de la présence de vie. Pour des raisons de faisabilité et de coûts, les missions qui auraient permis cela ont été abandonnées. Avec les instruments projetés actuellement, on pourra certes trouver de nouvelles molécules dans l'atmosphère d'exoplanètes, mais de là à trouver des signatures de la vie, je ne m'avancerais pas. Quoi qu'il en soit, la question de la détection de la vie dans l'Univers ne va pas s'éteindre pour autant. Il y a deux mille ans, les philosophes grecs débattaient déjà de cette question. Ce n'est pas maintenant, alors que l'on commence à avoir la capacité technique d'y répondre, que cela va s'arrêter. Cela prendra peut-être une génération, peut-être deux, mais cette recherche de la vie ailleurs va se poursuivre. ■

(1) D. Jontof-Hutter *et al.*, *Nature*, 522, 321, 2015.

(2) B. Macintosh *et al.*, *Science*, 350, 66, 2015.

(3) F. Motalebi *et al.*, *A&A*, 628, A39, 2015.

Et depuis ● ● ●

- 2016
Une équipe découvre, avec le spectrographe Harps, qu'une petite planète tourne autour de l'étoile Proxima du Centaure, à 4,2 années-lumière du Système solaire.
- 2017
L'instrument Espresso (7 tonnes) est installé sur le Very Large Telescope de l'ESO, au Chili. Il peut mesurer une vitesse radiale des étoiles inférieure à 0,1 mètre par seconde.
- 2018
Un satellite de la mission TESS de la Nasa découvre sa première exoplanète, HD 39091 c, située à environ 60 années-lumière.
- 2019
La barre des 4 000 exoplanètes recensées est franchie.



ENTRETIEN AVEC **BRIAN SCHMIDT**

ET POURTANT, L'EXPANSION DE L'UNIVERS S'ACCÉLÈRE...

L'astrophysicien américain Brian Schmidt, Prix Nobel de physique 2011, a découvert que, contre toute attente, l'expansion de l'Univers s'accélère. Un phénomène dû à l'énergie noire, une énergie répulsive encore bien mystérieuse.

Propos recueillis par **Denis Delbecq**

La Recherche En 2011, vous avez partagé un prix Nobel pour une découverte réalisée seulement treize ans plus tôt, qui a bouleversé la vision de l'évolution de l'Univers. Comment expliquer ce délai très court ?

Brian Schmidt Nos résultats et ceux de l'équipe de Saul Perlmutter, à l'université de Californie à Berkeley, en 1998, ont été une vraie surprise pour tout le monde (1). Avec mon équipe de la High-Z Supernovae Search Team, nous cherchions à prouver que l'expansion de l'Univers ralentissait et nous avons montré le contraire ! Si le prix Nobel est arrivé aussi rapidement, c'est sans doute parce que, dans notre sillage, un nombre considérable de travaux ont donné la même image de notre Univers, aussi surprenante fût-elle. La confirmation de nos résultats est arrivée très vite, malgré le choc provoqué par la découverte.

Pourquoi cherchiez-vous à prouver le ralentissement de l'expansion de l'Univers ?

À l'époque, le consensus se faisait autour de l'idée que la force de gravitation qui attire les éléments massifs devait, au bout d'un moment, ralentir l'expansion de l'Univers. Quand nous avons commencé ces recherches avec Adam Riess, en 1995, nous cherchions à mesurer le rythme de ce ralentissement pour esquisser le futur de l'Univers : vivrait-il une expansion infinie mais à une vitesse de plus en plus lente ou, au contraire, une inversion qui conduirait à une rétraction sur lui-même, un « Big Crunch » ? Nous travaillions

avec cet objectif sur des explosions d'étoiles, un certain type de supernovae. Elles se produisent à partir de naines blanches, des étoiles qui, après avoir brûlé leur hydrogène, se contractent sous l'effet de la gravité jusqu'à atteindre la taille d'une planète comme la Terre.

Qu'advient-il alors de ces naines blanches ?

Subrahmanyan Chandrasekhar, Prix Nobel de physique en 1983, a montré dès 1930 que, lorsque la masse de la naine blanche est voisine de 1,4 fois celle de notre Soleil et qu'elle capte de la matière d'une étoile voisine, il se produit une explosion thermonucléaire géante en quelques secondes. Ces supernovae, dites « de type Ia », sont rares mais 5 milliards de fois plus brillantes que notre Soleil. Plus étonnant encore, ces explosions se ressemblent presque parfaitement, où qu'elles se produisent. Leur luminosité apparente n'est donc fonction que de leur distance. Ce sont de vraies « chandelles témoins », qui permettent de mesurer des distances avec seulement 6 % d'incertitude. En mesurant le décalage vers le rouge de leur spectre – la répartition de leur rayonnement selon la longueur d'onde –, on peut calculer leur vitesse. Nous avons donc obtenu la vitesse d'expansion de l'Univers à différentes distances – soit à plusieurs époques de son histoire – et montré une accélération de l'expansion.

Comment avez-vous jugé vos premiers résultats ?

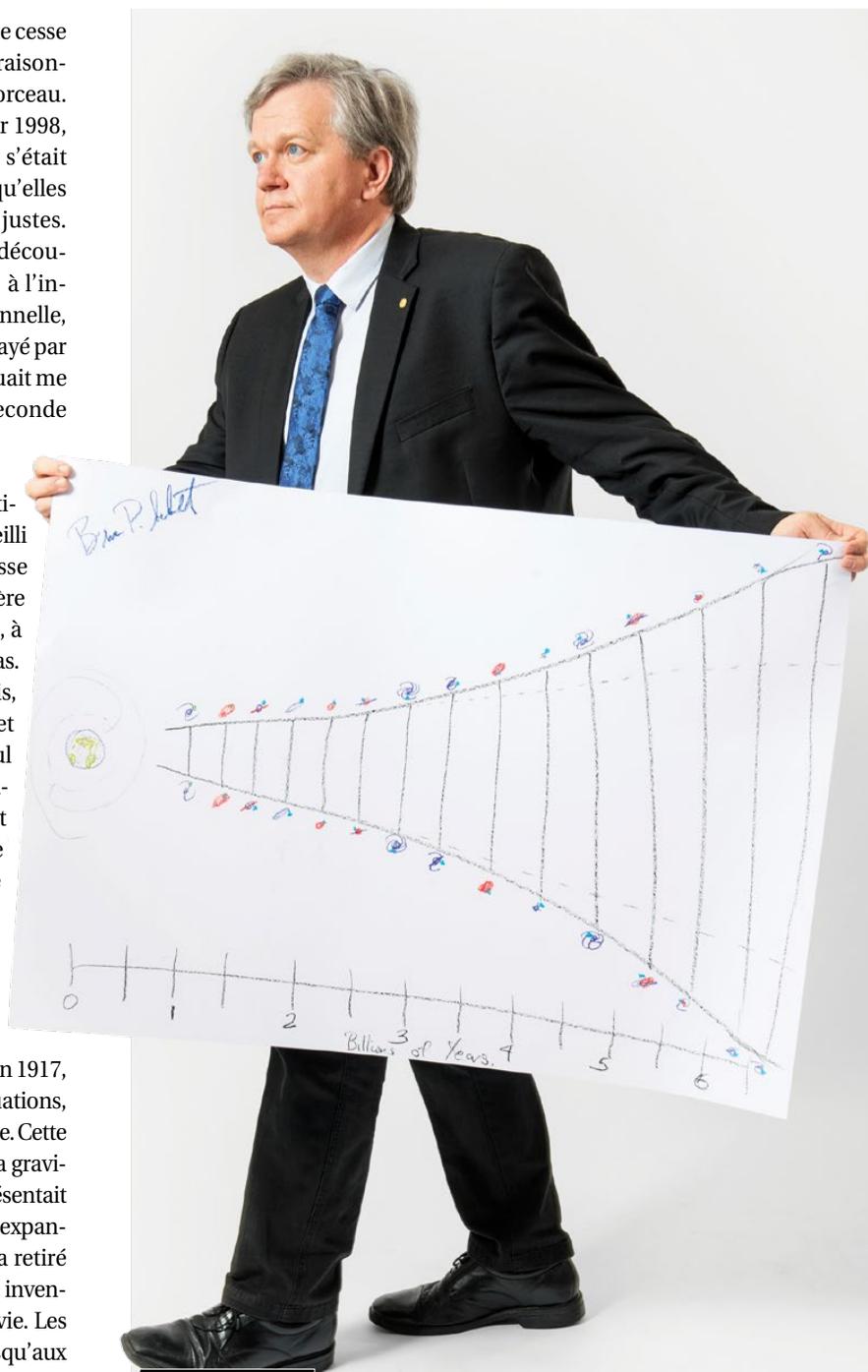
Quand Adam Riess m'a montré les premiers résultats, fin 1997, j'ai pensé qu'il s'agissait



d'une erreur. Dès lors, nous n'avons eu de cesse de la trouver en déconstruisant notre raisonnement et nos calculs, morceau par morceau. Mais, au bout du processus, en janvier 1998, il a fallu se rendre à l'évidence : on ne s'était trompés nulle part. Aussi incroyables qu'elles puissent paraître, les mesures étaient justes. J'ai écrit à Adam que nous venions de découvrir quelque chose dans l'Univers qui, à l'inverse de la force d'attraction gravitationnelle, repousse la matière. J'étais vraiment effrayé par cette découverte, tant ce qu'elle impliquait me semblait fou. Je n'imaginai pas une seconde convaincre nos collègues.

Comment ont-ils réagi ?

Je m'attendais à un extraordinaire scepticisme, à l'image de celui qui avait accueilli l'annonce, au Cern en 2011, de la vitesse des neutrinos plus rapides que la lumière et qui s'est révélée une erreur. Toutefois, à ma grande surprise, cela n'a pas été le cas. Il y a évidemment eu des critiques, mais, d'une manière générale, nos résultats et leur confirmation par l'équipe de Saul Perlmutter ont été bien accueillis. La communauté a vite compris qu'ils réglaiènt la principale question soulevée par le modèle cosmologique standard. Ce modèle, qui repose sur les équations de la relativité générale d'Einstein, fait l'hypothèse que l'Univers est homogène et respecte certaines symétries. Mais pour qu'il décrive un Univers statique, sans expansion, tel qu'on le considérait en 1917, Einstein a dû ajouter un terme à ses équations, que l'on appelle la constante cosmologique. Cette dernière servait à compenser l'effet de la gravitation, qui attire les masses, et donc représentait une force répulsive. Plus tard, une fois l'expansion de l'Univers démontrée, Einstein a retiré cette constante, considérant même cette invention comme la plus grosse bêtise de sa vie. Les choses en sont finalement restées là, jusqu'aux mesures sur les supernovae. Mais la découverte de l'accélération, qui ne peut s'expliquer que par la présence d'une mystérieuse énergie répulsive, représentant 73 % de l'énergie de l'Univers – que l'on a appelée l'énergie noire –, renvoie à l'idée de constante cosmologique d'Einstein. Et aujourd'hui, non seulement l'énergie noire fait partie du modèle standard, mais c'est elle qui lui permet de faire des prédictions qu'on vérifie ●●●



BRIAN SCHMIDT

1967 Il naît à Missoula, dans le Montana, aux États-Unis.

1993 Il obtient un doctorat en astronomie à Harvard.

1994 Il dirige le projet

international de recherche de supernovae baptisé High-Z Supernovae Search Team.

1998 Avec son équipe, il démontre

l'accélération de l'expansion de l'Univers.

2011 Il reçoit, avec Adam Riess et Saul Perlmutter, le prix Nobel de physique.

(*) Le principe d'indétermination d'Heisenberg

stipule qu'on ne peut pas connaître simultanément la vitesse et la position d'une particule.

▼ En suivant des milliers de galaxies (les points de couleur), le programme Sloan Digital Survey a permis de réaliser cette carte de l'Univers à différents décalages vers le rouge (différentes époques), ce qui aide à mesurer l'énergie noire.

●●● expérimentalement. Même si on ignore toujours de quoi il s'agit exactement.

Que peut être cette énergie noire ?

Les lois de la physique quantique, et en particulier le principe d'indétermination d'Heisenberg (*), nous expliquent que le vide contient lui aussi de l'énergie, laquelle est liée à la présence de particules virtuelles de matière et d'antimatière, qui apparaissent et disparaissent de manière furtive et imprévisible. On aimerait se dire que l'énergie noire correspond à cette énergie du vide, mais cela ne colle pas. Quand on fait les calculs, on trouve au moins 1 056 fois plus d'énergie que ce que l'on mesure comme énergie noire. Personne n'a de réponse aujourd'hui ; l'une des hypothèses est qu'une infime partie seulement de ces particules virtuelles apparaissent et disparaissent.

Que sait-on de l'évolution de l'énergie noire au cours de l'histoire de l'Univers ?

L'une de ses particularités est liée à ce qu'on appelle son équation d'état, la loi qui décrit comment évolue sa densité à mesure que l'Univers grandit. Pour la matière, l'équation est très simple : si on double le volume de l'Univers,

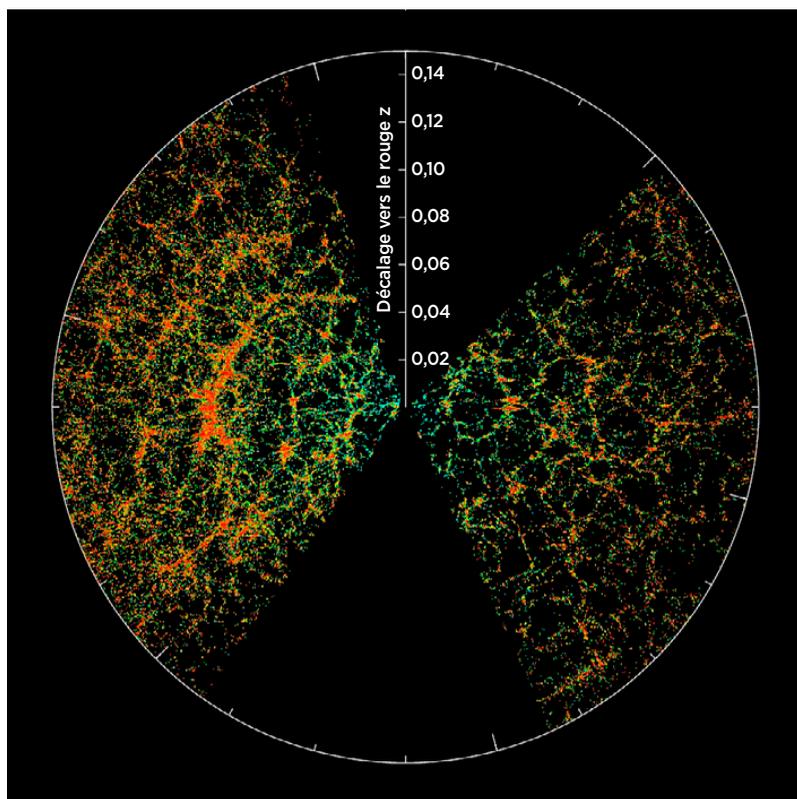
la densité de matière est divisée par deux. Pour l'énergie noire, l'équation d'état est différente : la densité reste constante quel que soit le volume de l'Univers. Au tout début de l'Univers, juste après le Big Bang, toute la matière étant concentrée dans un volume infinitésimal, sa densité était extraordinairement plus élevée qu'aujourd'hui. La force de gravité dominait donc, et c'est elle qui a gouverné l'expansion de l'Univers. Puis, à mesure que la matière s'est diluée, la force de répulsion liée à l'énergie noire a fini par prendre le dessus. On commence à voir son effet il y a environ 8 milliards d'années. Et depuis 6 milliards d'années, elle est devenue la force dominante, ce qui explique l'accélération de l'expansion de l'Univers qu'on observe aujourd'hui.

Depuis les premières mesures sur les supernovae, d'autres méthodes ont confirmé l'accélération de l'expansion de l'Univers. Quelles sont-elles ?

Jusqu'en 2011, les supernovae étaient le seul moyen de mesurer directement l'énergie noire. Mais on avait d'autres preuves indirectes. Par exemple, à partir des mesures du fond diffus cosmologique, l'héritage du premier rayonnement émis par l'Univers, 380 000 ans après le Big Bang. Ces mesures ont montré que la courbure de l'Univers liée à la gravitation est très faible, autrement dit que l'Univers est en quelque sorte plat. Et cela n'est possible que si toute la matière, qu'elle soit visible ou non, ne représente que 25 % de l'énergie de l'Univers, et donc que l'énergie noire en représente 75 %, ce qui est à peu de chose près ce que nous avons montré. En 2011, un autre type d'approche, la mesure d'oscillations acoustiques baryoniques, a apporté une nouvelle mesure directe de l'énergie noire, qui confirme que sa proportion est de 73 % (2).

Que sont ces oscillations ?

Elles correspondent aux ondes sonores du tout jeune Univers, que l'on peut observer dans le fond diffus cosmologique. Ces ondes acoustiques ont dessiné des motifs dans la répartition de la matière dans l'Univers, formant comme des ridules dont l'échelle caractéristique, d'environ 450 millions d'années-lumière, augmente avec l'expansion de l'Univers. Elles sont juste étirées avec l'expansion. En mesurant cette échelle à différentes époques, on mesure la vitesse d'expansion avec une grande précision.



Existe-t-il d'autres modèles qui, au contraire, ne font pas du tout appel à l'énergie noire ?

C'est vrai qu'un modèle d'Univers dans lequel la seule matière connue, celle dont nous sommes faits, ne représente que 4 %, le reste se partageant entre 23 % de matière noire et 73 % d'énergie noire, peut paraître peu satisfaisant [Les dernières analyses indiquent plutôt 68 % d'énergie noire, 27 % de matière noire et 5 % de matière ordinaire, NDLR]. C'est un peu comme un gros gâteau dont on ne voit que le glaçage sans savoir ce qui se trouve à l'intérieur. Les gens ont raison d'être sceptiques, mais la seule chose que peut faire la science, c'est faire des prédictions et les vérifier. Je ne peux évidemment pas vous dire que l'Univers est plat en regardant simplement par ma fenêtre ! Il existe en effet d'autres modèles de l'Univers – énergie sombre qui varie dans le temps, gravitation modifiée. S'ils permettent de faire des prévisions avec autant de justesse que le modèle standard, ce modèle est surtout le plus « économique » : il est compatible avec les observations et ne rajoute qu'un seul paramètre libre (la constante cosmologique) dans le modèle cosmologique. Cela nous laisse penser que la relativité générale décrite par Einstein, avec une constante cosmologique, décrit bien l'Univers dans lequel nous vivons. Ce modèle standard reste bien le plus solide, et il nous faut maintenant affiner nos observations et cartographier l'énergie noire pour reconstituer son histoire.

Par quels moyens ?

Avec les chercheurs du laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies, à Paris, nous étudions les supernovae plus proches, pour mesurer la quantité d'énergie noire présente il y a 1 à 2 milliards d'années. Mais c'est finalement plus difficile que de regarder très loin. Dans l'Univers proche, on ne voit plus les galaxies par milliers, mais une par une. Or les supernovae de type Ia sont des événements rares, qui surviennent une fois tous les 250 ans pour une galaxie comme la nôtre ; il faut donc suivre des milliers de galaxies pour espérer voir une supernova. Il y a surtout des expériences de bien plus grande envergure que celle-là. Comme Boss et Sloan Digital Survey, deux programmes de relevés du ciel à grande échelle qui étudient les oscillations acoustiques baryoniques et dont les résultats finaux seront connus prochainement. Dans le même temps, il y a le programme international Dark Energy

Survey (DES), qui a démarré à l'observatoire Cerro Tololo, au Chili. Avec une caméra à champ large installée sur le télescope Blanco de 4 mètres, le DES doit passer en revue plus de 300 millions de galaxies pour mesurer l'énergie noire à des distances jusqu'à 7 milliards d'années-lumière. Les résultats sont attendus d'ici 2020. Le LSST, un télescope avec le plus grand détecteur du monde – 3 200 millions de pixels – dont la construction a commencé en avril 2015, au Chili, fera un relevé tridimensionnel d'une vaste part de l'Univers à partir de 2022.

Ce sont des programmes de mesure à partir du sol. Qu'en est-il des projets spatiaux ?

Le projet le plus ambitieux est le satellite Euclid, de l'Agence spatiale européenne, un télescope dédié à la cosmologie qui doit être lancé vers 2020 pour observer des milliards de galaxies. Car, de l'espace, on voit mieux et plus loin ! Grâce à ses instruments, en particulier ceux qui analysent le rayonnement infrarouge, Euclid devrait apporter un facteur dix à la précision des mesures de l'énergie noire et de son évolution. Il devrait aussi réaliser des mesures à partir de l'effet de lentille gravitationnelle, une approche sur laquelle nous fondons beaucoup d'espairs.

Quel en est le principe ?

La lumière d'un objet qu'on reçoit sur nos télescopes a été très légèrement déviée par la gravité liée à la matière qui se trouve sur le trajet, ce qui déforme les images un peu comme une mauvaise lentille. En mesurant cette altération des images des galaxies, on peut déduire la quantité de matière qui l'a provoquée. En observant des galaxies à différentes distances par cette méthode – et donc à différentes époques de notre histoire –, on mesure l'expansion de l'Univers. L'effet de lentille gravitationnelle permettra de voir combien l'énergie noire est montée en puissance au fil du temps. L'équipe de Yannick Mellier, à l'Institut d'astrophysique de Paris, travaille là-dessus (3). Mais il y aura du chemin à parcourir pour atteindre de cette manière la précision qu'on a déjà, par exemple avec les supernovae et les oscillations acoustiques baryoniques. Nous n'en sommes encore qu'au début. ■

(1) A. Riess *et al.*, *AJ*, 116, 1009, 1998 ; S. Perlmutter *et al.*, *ApJ*, 517, 565, 1999.

(2) C. Blake *et al.*, *MNRAS*, 415, 2876, 2011 ; L. Anderson *et al.*, arXiv:1203.6594v1 [astro-ph.CO], 2012.

(3) T. Schrabback *et al.*, *A&A*, 516, A63, 2010.

Et depuis ●●●

2019

Le programme Dark Energy Survey de l'observatoire Cerro Tololo, au Chili, s'achève après six ans d'étude de la structure de l'Univers. L'analyse des résultats est en cours.



LE CHOC DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Cent ans après la prédiction théorique d'Albert Einstein, les ondes gravitationnelles ont été détectées lors d'une fusion de trous noirs. Un événement.

Sylvain Guilbaud, journaliste

« **N**ous avons détecté les ondes gravitationnelles! » Jeudi 11 février 2016, à Cascina, près de Pise en Italie, à Washington et à Paris, les physiciens ont laissé éclater

leur joie lors de l'annonce simultanée de cette découverte exceptionnelle, survenue à l'automne 2015. Et pour cause : c'est une nouvelle ère pour l'astronomie qui s'ouvre en beauté. Les ondes gravitationnelles en question, des vibrations de la structure de l'espace-temps qui se propagent dans l'Univers comme des ondelettes à la surface de l'eau, ont été émises lors de la violente fusion de deux trous noirs situés à plus d'un milliard d'années-lumière de nous ! C'est la première fois qu'un tel phénomène est observé.

Cerise sur le gâteau, cette annonce se produit exactement un siècle après la prédiction théorique de l'existence de ces ondes gravitationnelles par Albert Einstein, dans un article publié en juin 1916. Le célèbre physicien vient alors tout juste de développer la relativité générale, une théorie révolutionnaire selon laquelle l'Univers est constitué par l'espace-temps, une sorte de tissu à la fois immatériel et malléable. L'espace-temps se courbe sous l'effet de la masse des corps célestes et, en retour, les corps célestes se meuvent en épousant la courbure de l'espace-temps.

Les ondes gravitationnelles sont une manifestation de ce caractère malléable de l'espace-temps. Un astre immobile, ou dont la masse est répartie de façon sphérique et symétrique comme une étoile, engendrera une déformation fixe de l'espace-temps. En revanche, deux astres tournant l'un autour de l'autre, par

exemple, ont le même effet qu'un caillou jeté dans un lac : la déformation se propagera sous la forme d'une onde. Si, dans le cas du caillou, les molécules d'eau s'agitent de bas en haut, dans le cas des ondes gravitationnelles, c'est l'espace-temps qui vibre.

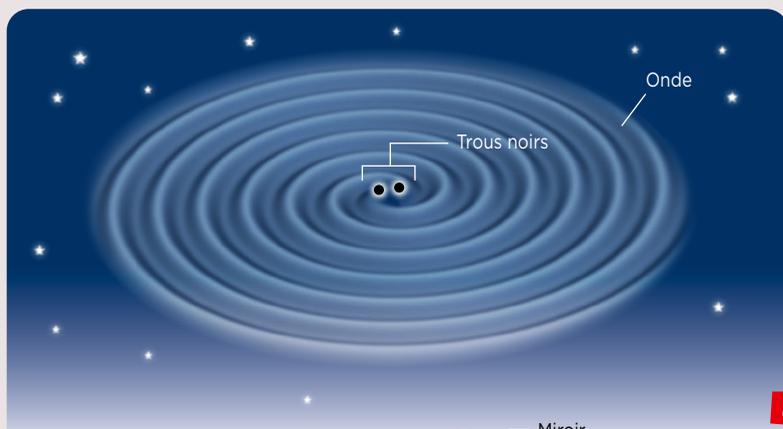
« Nous avons observé exactement ce qu'Einstein avait prédit », assure David Reitze, directeur exécutif de Ligo, l'observatoire qui a permis cette découverte aux États-Unis. Une nouvelle preuve qui valide la relativité générale. Les ondes gravitationnelles avaient certes déjà été détectées indirectement en 1974 par les Américains Russell Hulse et Joseph Taylor, qui reçurent pour cette découverte le prix Nobel de physique en 1993. « Cependant, cette détection directe ouvre une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers », sourit Benoît Mours, responsable pour la France de l'instrument Virgo, l'analogue de Ligo installé en Italie.



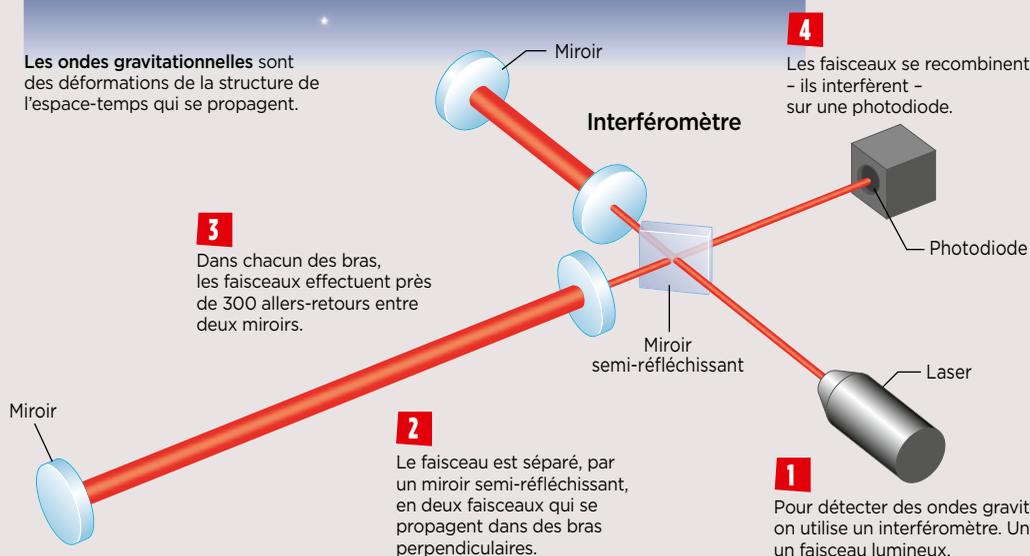
LA LUMIÈRE COMME RÈGLE

Si cette découverte est à ce point extraordinaire, c'est que cette expérience représente un authentique tour de force. Les longueurs se contractent au passage d'une onde gravitationnelle, mais, en dépit de l'intensité des phénomènes cosmiques qui les causent, leur effet est minuscule : il faut pouvoir capter des déformations cent millions de fois plus petites que la taille d'un atome ! Pour cela, inutile d'utiliser une règle matérielle, aussi précise soit-elle : elle serait également déformée au passage de l'onde gravitationnelle et ne mesurerait alors aucun effet. Les physiciens ont donc utilisé une règle qui ne

Des vagues dans l'espace



Les ondes gravitationnelles sont des déformations de la structure de l'espace-temps qui se propagent.



3 Dans chacun des bras, les faisceaux effectuent près de 300 allers-retours entre deux miroirs.

2 Le faisceau est séparé, par un miroir semi-réfléchissant, en deux faisceaux qui se propagent dans des bras perpendiculaires.

4 Les faisceaux se recombinent - ils interfèrent - sur une photodiode.

1 Pour détecter des ondes gravitationnelles, on utilise un interféromètre. Un laser émet un faisceau lumineux.

A - Signal non perturbé



B - Signal perturbé



5 **A. En l'absence d'ondes gravitationnelles**, les faisceaux sont en opposition de phase: ils s'annulent (les interférences sont destructives).

B. Le passage d'une onde gravitationnelle étire ou contracte la longueur d'un des bras. Les faisceaux ne s'annulent plus parfaitement et la photodiode enregistre un signal d'interférence.

s'étire ni ne se contracte: la lumière. La vitesse de la lumière (*) étant immuable, si l'espace entre deux points s'étire, la lumière va mettre plus de temps à parcourir la distance entre eux. Si l'espace se contracte, la lumière mettra moins de temps à parcourir ce trajet. Voici l'idée de base des instruments Ligo et Virgo. On les appelle des interféromètres (voir le schéma ci-dessus). Un faisceau de lumière laser est séparé en deux faisceaux envoyés dans deux directions perpendiculaires, les deux « bras » de l'interféromètre. Au bout de chaque bras, les deux faisceaux sont réfléchis par un miroir puis recombinaés. Pour que le trajet soit le plus long possible, les bras mesurent plusieurs kilomètres de long (4 km pour Ligo, 3 km pour Virgo) et les faisceaux font plusieurs centaines d'allers-retours dans chaque bras avant d'être recombinaés. Cela équivaut à disposer de deux bras perpendiculaires de centaines de kilomètres de long. En l'absence d'ondes gravitationnelles,

les distances ne sont pas perturbées et la différence de longueur entre les deux bras fait que les minimums des oscillations de la lumière d'un des faisceaux correspondent aux maximums de l'autre: il n'y a pas de signal, on dit que les interférences sont destructives.

Le passage d'une onde gravitationnelle modifie différemment la longueur d'un bras et celle du bras perpendiculaire. Le trajet de la lumière est perturbé, de sorte que les oscillations ne correspondent plus: l'interférence est constructive. Ainsi, le passage d'une onde est mesuré en enregistrant ces interférences. En pratique, il faut aussi s'affranchir au maximum de toutes les vibrations parasites: l'intérieur de la Terre est la source d'un bruit sismique permanent, mais les variations de température des composants suffisent aussi à créer des mouvements indésirables. Tous les composants principaux sont donc suspendus sous vide à des « superatténuateurs » qui les isolent du bruit sismique.

(*) La vitesse de la lumière vaut exactement 299 792 458 mètres par seconde dans le vide.



▲ L'interféromètre Virgo est situé à Cascina, en Italie. Du bâtiment central, un laser émet un faisceau lumineux qui, séparé par un miroir, va se propager dans les deux bras longs de 3 km.

Et depuis ●●●

● 2017

L'instrument Advanced Virgo détecte la première fusion de deux étoiles à neutrons.

● 2019

La troisième campagne d'observation d'ondes gravitationnelles démarre et s'achèvera au printemps 2020.

●●● Ligo, dont deux instruments sont construits aux États-Unis, à Hanford, dans l'État de Washington, et à Livingstone, en Louisiane, et Virgo, à Cascina, en Italie, ont éprouvé leurs premières versions au milieu des années 2000. Mais leur sensibilité s'est révélée insuffisante : aucune détection en dix ans d'observation. Après des travaux d'amélioration, Virgo devrait récolter ses premières données fin 2016, tandis que Ligo a recommencé ses expériences avec une sensibilité accrue en septembre 2015. Dès le 14 septembre 2015, avant même le lancement officiel de la campagne d'observation, les deux détecteurs Ligo ont perçu un signal décalé dans le temps de 7 millisecondes, correspondant exactement au temps nécessaire à une onde gravitationnelle, qui se déplace à la vitesse de la lumière, pour parcourir la distance entre les deux instruments.

« Le signal était juste magnifique », se souvient Frédérique Marion, membre de Virgo, qui a pris part à l'analyse des données. Si la découverte a été faite par Ligo, les scientifiques de Virgo ont tout autant participé à l'analyse et à la vérification des résultats. Pas moins de 1 009 personnes signent le premier article (1). Tenus à un strict secret, ils ont dû faire face aux rumeurs, aux fuites et aux remous d'un buzz avant-coureur sur Twitter. Finalement, ce

signal aura fait frémir autant les physiciens que l'espace-temps ! La performance expérimentale est extraordinaire. Mais l'origine céleste de cette détection l'est aussi. Ces ondes gravitationnelles sont le fruit du ballet cosmique de deux trous noirs de masses respectivement 29 fois et 36 fois celle du Soleil. La fin de la danse est effrénée : ces mastodontes distants de seulement quelques centaines de kilomètres tournoient l'un autour de l'autre à une allure folle, 50 % de la vitesse de la lumière. Ils fusionnent alors en moins de 5 secondes – c'est la coalescence – en un trou noir unique de 62 masses solaires, en émettant un *chirp*, autrement dit un « gazouillis » d'ondes gravitationnelles.

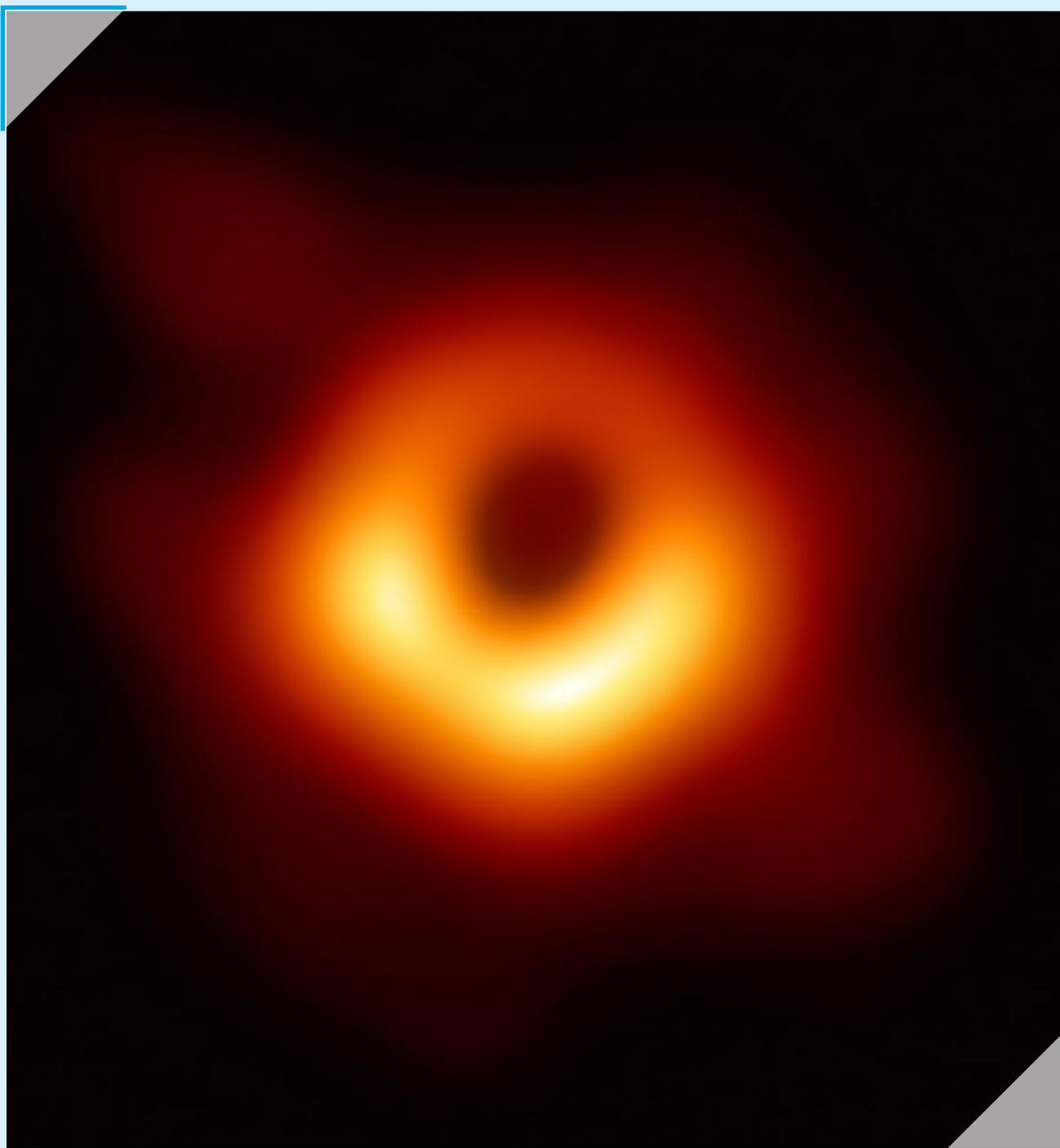
Les trois masses solaires manquantes ont été converties en énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. « C'est plus d'énergie que mille supernovae ! » s'exclame Luc Blanchet, théoricien à l'Institut d'astrophysique de Paris. Le trou noir final vibre l'espace d'un instant avant de se stabiliser. Là s'arrête l'émission d'ondes gravitationnelles. Toutes ces observations sont conformes à la théorie, mais il est surprenant d'observer des trous noirs stellaires de cette masse.

DES INDICES SUR LA MATIÈRE NOIRE

En outre, beaucoup de spécialistes s'attendaient à ce que le premier signal gravitationnel soit dû à la fusion d'étoiles à neutrons, que l'on pensait plus fréquente que celle de trous noirs. « On ne savait pas bien estimer le nombre de coalescences de trous noirs », poursuit l'astrophysicien. Mais ces phénomènes permettront de nouveaux tests de la relativité générale, et peut-être du modèle standard de la cosmologie. Les ondes gravitationnelles pourraient ainsi fournir des indices sur les mystérieuses matière et énergie noires qui composent l'Univers. Pour cela, il faudra plus d'observations.

La mise en service de Virgo permettra de localiser plus précisément l'origine des ondes par triangulation et des instruments analogues en préparation en Inde et au Japon compléteront ce réseau d'observatoires d'un nouveau type. D'autres détecteurs sensibles à des phénomènes différents sont aussi en préparation. « Ce qui est sûr, conclut Frédérique Marion, c'est que l'émotion autour des ondes gravitationnelles n'est pas près de retomber. » ■

(1) Collaboration Ligo et Virgo, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102, 2016.



PREMIÈRE IMAGE D'UN TROU NOIR

Publiée le 10 avril 2019, cette « photo », obtenue grâce au projet Event Horizon Telescope, réseau mondial de radiotélescopes, montre pour la première fois le disque d'accrétion du trou noir M87. Un trou noir supermassif situé à plus de 50 millions d'années-lumière de notre Galaxie, au centre de la galaxie M87, et dont la masse correspond à 6,5 milliards de fois celle de notre Soleil!*

Et aussi...



▲ Jupiter s'est révélée sous l'objectif des sondes Voyager.

Voyager dévoile Jupiter

1979 Au début des années 1970, la Nasa décide de lancer deux sondes, Voyager 1 et Voyager 2, à la rencontre de Jupiter et de Saturne. En 1977, les deux sondes sont envoyées dans l'espace, c'est le début d'une exploration fructueuse qui durera plusieurs décennies. Ces jumelles de plus de 800 kg embarquent une douzaine d'instruments de mesure pour passer au peigne fin les planètes et leurs alentours : des caméras, des magnétomètres pour mesurer le champ magnétique, des antennes pour déterminer le champ électrique, et des détecteurs de plasma pour étudier le milieu qui les entoure... L'exploration permet de mieux comprendre l'intérieur des planètes et de découvrir les anneaux de Jupiter. Les sondes dévoilent ainsi Europe, satellite de Jupiter qui abrite un océan caché sous une croûte de glace de plusieurs kilomètres d'épaisseur. Pour la première fois, des volcans sont surpris en pleine éruption à la surface de Io, autre satellite de Jupiter. Au total, les sondes Voyager découvrent 33 lunes et permettent de réaliser une cartographie précise du Système solaire. Après Jupiter en 1979, Saturne en 1981, la mission est prolongée vers Uranus et Neptune. Voyager continue son périple aujourd'hui aux confins du Système solaire. ■

Rosetta redessine le portrait des comètes

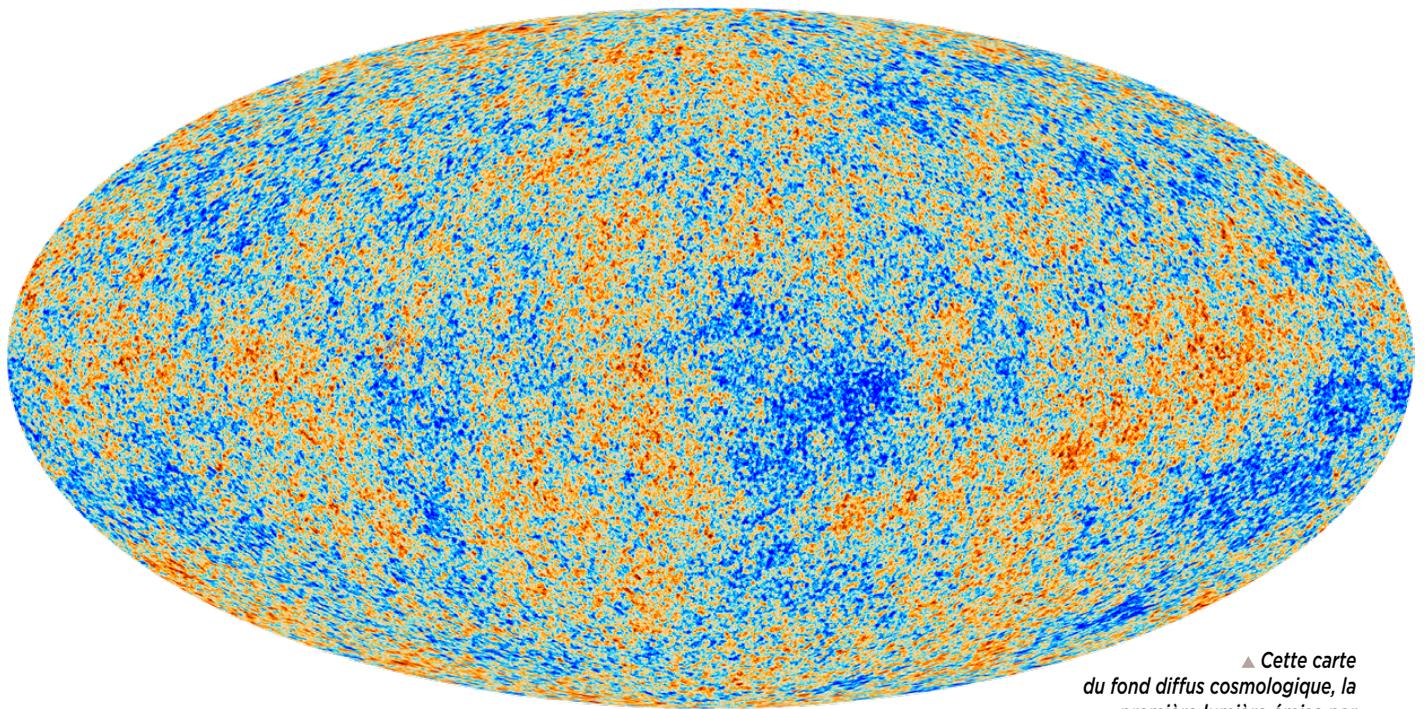
2014 « La mission Rosetta nous en a appris plus sur les comètes que toutes les missions précédentes. Elle restera l'une des grandes étapes de l'exploration du Système solaire », estime Jean-Pierre Bibring, de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay, et responsable scientifique français de Philae, l'atterrisseur qui s'est posé sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, après deux ans d'analyse de données, le clap de fin est survenu le 30 septembre 2016, lorsque les scientifiques ont mis un terme à la mission en provoquant l'écrasement de Rosetta sur la surface cométaire. On sait désormais que la comète est faite de glace et de molécules organiques. L'analyse chimique du gaz émis par la comète

– sa chevelure –, réalisée par Rosina, spectromètre de masse de haute résolution embarqué sur la sonde Rosetta, fournit des résultats impressionnants. La principale surprise a été la teneur élevée en dioxygène (O₂) – quelques pour cent –, dont on n'explique pas l'origine. Parmi les composés organiques, on note la présence d'hydrocarbures aromatiques, tels que le naphthalène, le xylène, le benzène et le toluène (1). L'autre détection notable concerne la glycine. Cet acide aminé entre dans la composition de nombreuses protéines biologiques. Une découverte qui confère aux comètes, en tant que fournisseurs de briques élémentaires du vivant, un rôle renforcé dans l'apparition de la vie sur Terre. ■

(1) tinyurl.com/Cometary-zoo



▲ Rosetta (à gauche) et son atterrisseur Philae (au centre) ont exploré la comète Tchouri durant deux ans (montage).



▲ Cette carte du fond diffus cosmologique, la première lumière émise par l'Univers, a été réalisée grâce aux données du satellite Planck.

La première lumière de l'Univers

2013 En 2013, la carte du fond diffus cosmologique, la première lumière émise par l'Univers, a été dressée avec précision par le satellite Planck, lancé en 2009. Selon les astronomes, ces données viennent confirmer de manière éclatante le modèle du Big Bang, l'idée selon laquelle l'Univers était extrêmement chaud et dense à ses débuts et occupait un volume incroyablement petit, avant de grandir et de se refroidir. Émise 380 000 ans environ après le Big Bang, la première lumière de l'Univers est toujours observable aujourd'hui. Du fait de l'expansion de l'Univers,

sa température associée a chuté drastiquement : elle est de 2,7 kelvins en moyenne (- 270,45 °C). Toutefois, observée avec cette précision, cette pâle lueur présente de minuscules différences de température qui intéressent au plus haut point les astronomes. Elles ne permettraient rien de moins que de décrypter l'histoire de l'Univers. On pense en effet qu'elles reflètent des différences de densité – des « grumeaux » – dans la matière, qui sont apparues avant l'époque où la première lumière a été émise. Ces grumeaux allaient ensuite donner naissance aux premières étoiles et autres galaxies. ■

Curiosity découvre les traces de rivières martiennes

2013 Un an seulement après son arrivée sur Mars, dans le cratère Gale, le robot de la Nasa, Curiosity, apporte la preuve tant attendue que l'environnement de la planète fut un jour propice à l'émergence de la vie. La découverte vient conforter, in situ, le scénario que les planétologues avaient élaboré ces dernières années, mais seulement à partir des

observations réalisées par les satellites en orbite.

En septembre 2012, les caméras de Curiosity dévoilent deux affleurements rocheux atypiques : l'inspection révèle qu'ils contiennent des galets aux bords arrondis, dont la taille se situe entre 2 et 40 millimètres de diamètre. Ces sédiments martiens sont identiques à ceux que l'on retrouve sur Terre dans le lit des rivières :

elles emportent et font rouler des graviers qui s'arrondissent ainsi avec le temps. Qui plus est, la taille des plus gros galets martiens permet d'exclure leur dépôt par le vent. La conclusion des chercheurs, détaillée dans un article de la revue *Science* en mai 2013, est alors sans appel : une rivière coulait autrefois à cet endroit (1). En tenant compte de la taille des galets et de la pente, l'équipe menée par Rebecca Williams, du Planetary Science Institute, aux États-Unis, parvient même à estimer que le cours d'eau, peu profond, devait arriver à

hauteur de hanche et s'écoulait tranquillement à la vitesse d'un piéton qui marche. Cette découverte est importante. C'est en effet la première fois qu'on recueille les traces d'un écoulement d'eau liquide directement sur le sol de la planète. Avec ce résultat, c'est désormais une certitude : les canyons, vallées fluviales et deltas photographiés depuis longtemps par les satellites dans de nombreuses régions de Mars attestent bien de la présence de rivières lors de la jeunesse de la planète. ■

(1) R. Williams *et al.*, *Science*, 340, 1068, 2013.

LE SÉISME DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

À l'aube des années 1970, les preuves étayant la théorie de la tectonique des plaques s'accumulent. Pourtant, il faudra des années pour qu'elle s'impose. Récit.

Jacques-Olivier Baruch, journaliste

À 700 kilomètres au large des Açores, trois hommes sont confinés dans l'*Archimède*, petit sous-marin océanographique de la Marine française.

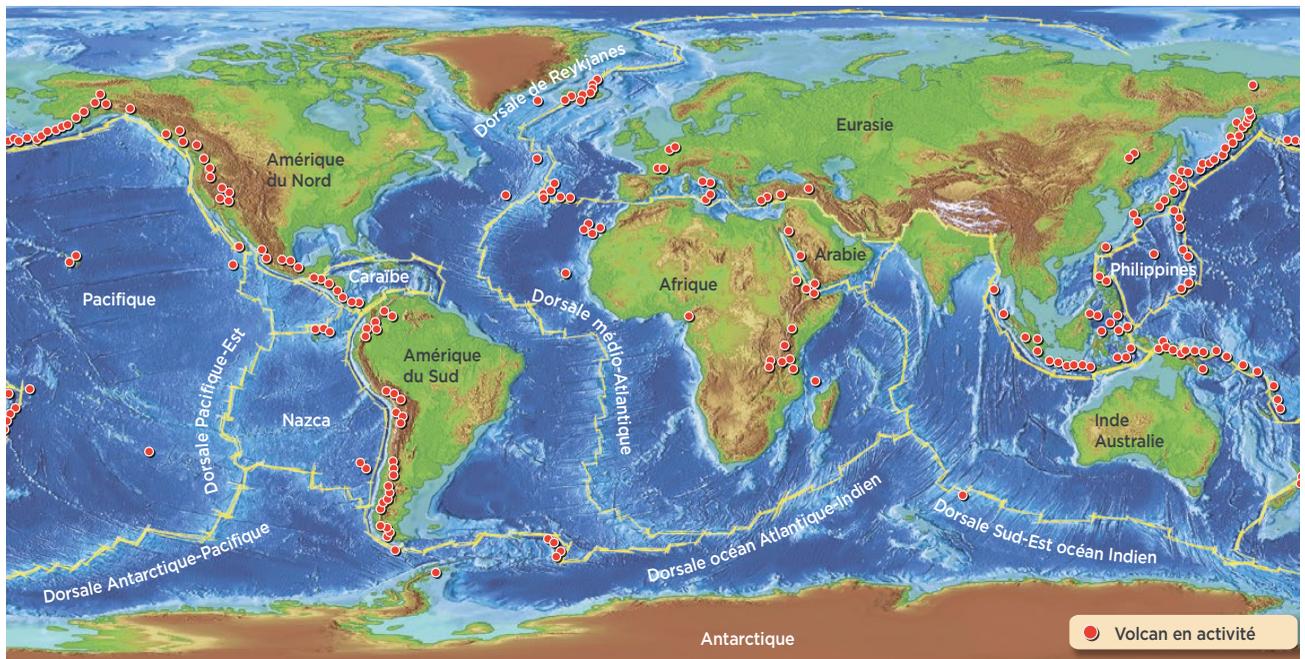
Xavier Le Pichon, géophysicien au Centre national pour l'exploitation des océans (Cnexo, ancêtre de l'Ifremer), regarde par le hublot. Ce 2 août 1973, c'est la première fois que des hommes observent de leurs propres yeux le plancher océanique. Ils sont à 2539 mètres sous le niveau de la mer, dans une plaine large de 2 kilomètres, encaissée entre deux hautes parois. C'est le fond de la dorsale médio-atlantique, la double chaîne de montagnes qui balafre l'océan en son milieu. Ils voient un parterre de jeunes laves solidifiées, qui ont les mêmes formes de coussins que les basaltes des volcans sous-marins d'Hawaï qui durcissent dans l'eau froide. Comme eux, elles surgissent du manteau terrestre qui affleure à cet endroit. « *Je rencontrais la Terre à peine sortie de la Genèse, une terre minérale que les projecteurs du bathyscaphe faisaient, pour la première fois, émerger de sa nuit glacée* », écrira Xavier Le Pichon quelques années plus tard (1). Cette première observation de la naissance du plancher océanique prouve au géophysicien la justesse de la théorie de la tectonique des plaques, dont il a été l'un des pères fondateurs cinq ans avant. Elle fait partie des arguments forts qui portent un coup fatal à l'ancienne géologie fixiste. La surface de la planète n'est pas figée ou seulement animée de mouvements verticaux comme les géologues le pensaient, mais constituée de plaques presque rigides en perpétuel mouvement sous l'action de la convection du manteau.

Depuis six ans, la communauté des géologues ne parle que de cela. Le 17 avril 1967, lors de la grand-messe des sciences de la Terre qu'est la réunion de printemps de l'American Geophysical Union, un Américain de l'université de Princeton, Jason Morgan, évoque les questions géométriques posées par l'écartement, sur une Terre sphérique, de blocs qu'il suppose rigides. Il prend pour exemple l'océan Atlantique et la dorsale qui le balafre. Il montre que le mouvement des blocs américain et eurasien est bien décrit par une rotation autour d'un axe, comme le montre la géométrie sphérique. Les mouvements à la surface de la Terre ne sont donc pas dus à la dérive de continents qui flottent sur le manteau, mais aux mouvements les uns par rapport aux autres des blocs rigides, dont certains portent des continents.

TAPIS ROULANT OCÉANIQUE

Le Britannique Dan McKenzie, avec son collègue de l'université de Cambridge Robert Parker, a la même idée, qu'il publie dans la revue *Nature* en décembre suivant (2). La Terre n'est ni en expansion ni en contraction, mais d'un volume stable. Sa surface est un agencement de « plaques », terme qu'ils sont les premiers à utiliser. Ces plaques sont des morceaux de la lithosphère, composée de la croûte et de la partie rigide du manteau supérieur. Elles bougent sous l'action de la convection de l'asthénosphère, la partie inférieure du manteau, plus visqueuse. L'article de Jason Morgan prend quant à lui du retard et n'est publié que l'année suivante, en mars 1968 (3). Fort de ces contributions, Xavier Le Pichon, alors à l'observatoire géologique Lamont, à





▲ La surface de la Terre est constituée d'une mosaïque de plaques, dont les limites (en jaune) sont le siège de la majorité des séismes et des volcans (en rouge). Certaines plaques, comme la plaque américaine, portent un continent, d'autres, comme la plaque Pacifique, ne sont occupées que par un océan.

Palisades, dans l'État de New York, élabore la même année le premier modèle de cinématique global de six plaques recouvrant la sphère terrestre (4). Il décrit donc leurs mouvements depuis 150 millions d'années. Ainsi, la surface terrestre est constituée d'un agencement de plaques rigides dont l'épaisseur varie entre 70 et 100 kilomètres – on en reconnaît aujourd'hui douze grandes et une multitude de petites –, dont les limites sont les sites de la plupart des volcans actifs de la planète et de la majorité des séismes. Le plancher océanique se crée au niveau des dorsales, puis s'étend de chaque côté, tel un tapis roulant en glissant le long des failles (Fig. 1). Il disparaît dans les zones de subduction, où une plaque s'enfonce sous une autre. C'est la convection du manteau sous-jacent qui en est le moteur. Les géophysiciens, convaincus, voient dans ce modèle un outil prédictif de l'ensemble des manifestations géologiques, en particulier les séismes et les volcans. Ils avaient déjà été les premiers à accepter l'idée de l'expansion des fonds océaniques, proposée par le géologue et ancien officier de marine Harry Hess en 1960 et prouvée en 1963 par les Britanniques Fred Vine et Drummond Matthews, ainsi que le Canadien Lawrence Morley. Ceux-ci avaient montré que les roches des fonds océaniques présentaient une alternance d'aimantations nord et sud, symétrique par rapport aux dorsales. Ils expliquaient ces différences d'aimantation par l'effet conjoint

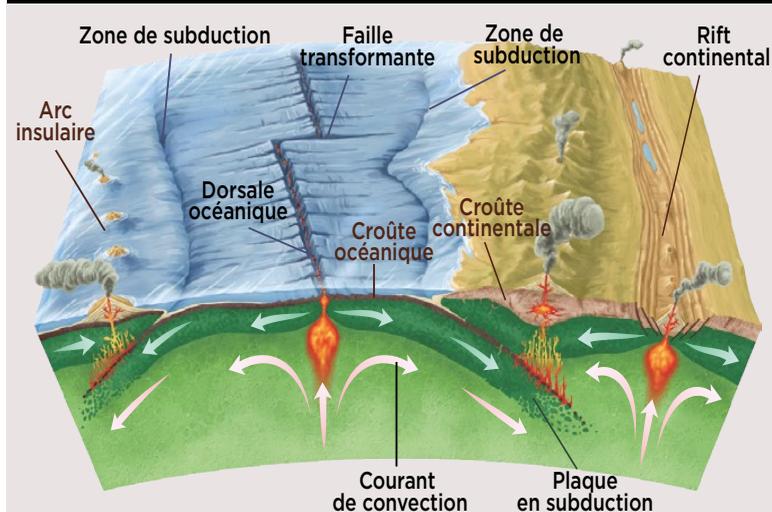


▲ Le géophysicien français Xavier Le Pichon est l'un des pères fondateurs de la théorie de la tectonique des plaques.

des inversions successives du champ magnétique terrestre et de l'expansion des fonds océaniques. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les navires océanographiques américains, équipés de sonars, de sismomètres et de magnétomètres, ont sillonné les océans. « Ils ont relevé la topographie des fonds afin de repérer les endroits où des sous-marins ennemis pouvaient se cacher, explique Xavier Le Pichon. Ils ont aussi cartographié le champ magnétique local pour le comparer à celui que ces engins pouvaient générer. » Les dorsales et les fosses ont été ainsi mieux connues, l'épaisseur de la croûte océanique a été mesurée. C'est grâce à ces données que Harry Hess a élaboré son modèle de tapis roulant océanique, précurseur de la tectonique des plaques.

Mais les géologues traditionnels sont réticents. Ce sont des scientifiques « continentaux », qui ne s'intéressent pas aux sciences marines. Leur préoccupation est la formation des montagnes, qu'ils expliquent par des mouvements essentiellement verticaux. La compréhension des déformations des couches géologiques n'a pas besoin de la vue globale d'une surface terrestre en mouvement. Selon eux, les volcans ou la sismicité n'ont rien à voir avec la formation des montagnes.

La deuxième raison de leur réticence est purement scientifique. Des observations semblent contredire la théorie. La rigidité des plaques ? Faux, disent les géologues, puisque des montagnes se forment sur les continents. Les volcans seraient des manifestations des frontières ●●●

Fig. 1 Le renouvellement de la surface

Les plaques bougent sous l'action de la convection du manteau. Le plancher se crée au niveau des dorsales océaniques ou dans les rifts continentaux. Quand deux plaques océaniques se rencontrent, un arc insulaire de volcans se forme. Quand au moins un bord de plaque est constitué par un continent, une chaîne de montagnes se forme.

Pour ne pas les contrer directement, il avait qualifié son hypothèse d'expansion des fonds océaniques de « modèle géopoétique ». Au cours des années 1970, les preuves s'accumulent. Les forages effectués grâce au navire *Glomar Challenger* entre 1969 et 1975 permettent de dater la croûte océanique en différents points du globe. Ils confirment qu'elle est de plus en plus vieille à mesure qu'on s'éloigne des dorsales.

LA THÉORIE ENTRE À L'ÉCOLE

À partir de 1973, les plongées des submersibles français *Archimède* et *Cyana* ou de l'américain *Alvin* montrent que la géologie de la croûte océanique correspond bien à la création de plancher dans les rifts des dorsales et à son engoulement dans les zones de subduction. Alvin découvre la première source hydrothermale active. On comprend alors que ces sources dégagent par convection les deux tiers du flux de chaleur du manteau. Le flux calculé par Xavier Le Pichon à partir de la vitesse d'expansion des fonds océaniques n'était que la partie qui se transmet par conduction à travers les roches.

Après 1978, lors des réunions des sciences de la Terre auxquelles participe toute la communauté géologique française, aucune voix fixiste ne se fait plus entendre. Le coup de grâce est porté par les mesures géodésiques effectuées par l'ancêtre du GPS et qui commencent en 1981. Elles confirment de façon éclatante le mouvement des plaques prédit par la théorie, non plus sur des millions d'années, mais quasiment en temps réel, à l'échelle de l'année. Hawaï et le Japon se rapprochent bien de 10 centimètres par an.

Plus personne ne met en doute la théorie de la tectonique des plaques. C'est sans doute pourquoi l'Éducation nationale se décide enfin à enseigner le nouveau modèle. Les lycéens de première scientifique en entendent parler à partir de 1982. La théorie est évoquée en primaire en 1985 pour expliquer la répartition des séismes et des volcans. Les collégiens de quatrième attendront 1988. Depuis 1992, le cadre dans lequel les cours sont donnés ne s'appelle plus la géologie, mais les sciences de la Terre. Preuve que la géologie a définitivement perdu sa suprématie. ■

- (1) Xavier Le Pichon, *Kaiko*, Odile Jacob, 1986.
- (2) D. McKenzie et R. L. Parker, *Nature*, 216, 1276, 1967.
- (3) W. J. Morgan, *JGR*, 73, 1959, 1968.
- (4) X. Le Pichon, *JGR*, 73, 3661, 1968.

Et depuis ●●●

● 2016

Grâce à des simulations numériques, Claire Mallard (Laboratoire de géologie de Lyon) et ses collègues expliquent pourquoi il existe 53 plaques : c'est le fruit de l'interaction entre les mouvements convectifs du manteau et la résistance de la croûte terrestre.

● 2019

Une équipe de l'Institut des sciences de la Terre (Grenoble) fait reculer le début de la tectonique des plaques à 3,3 milliards d'années, alors qu'on l'avait estimé précédemment à 2,7 milliards d'années.

●●● des plaques que sont les dorsales et les fosses océaniques ? Faux, l'archipel d'Hawaï s'est développé sur place au milieu du Pacifique. Idem pour les séismes, puisque les plus forts ont eu lieu en Chine, à l'intérieur d'un continent.

La troisième raison est plus d'ordre sociologique : la tectonique des plaques est le sujet d'affrontement entre générations. Les jeunes géologues sont avant tout géophysiciens. Ils sont sismologues, magnéticiens, géodésistes. Ils utilisent des outils, des méthodes et des données récentes. Les géologues traditionnels sont plus âgés et, surtout, tiennent les rênes du pouvoir scientifique. C'est le cas de Vladimir Belousov en URSS, des géologues de l'association Chidanken au Japon, de Sir Harold Jeffreys, spécialiste britannique des sciences de la Terre, ou de Raymond Fischesser, directeur de l'École des mines en France, qui refusent d'en entendre parler. Seule l'université Paris-VII, créée en 1970, enseigne le modèle. Le nouveau directeur du département des sciences de la Terre est le jeune géochimiste Claude Allègre. Il convainc Xavier Le Pichon de prendre en charge cet enseignement en 1971. Aucune autre université française ne le fera avant 1977.

Ce poids prédominant de la génération au pouvoir n'est pas nouveau. Déjà en 1960, Harry Hess s'était heurté à ses supérieurs hiérarchiques.

RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE À LA UNE

En pleine canicule, le climatologue James Hansen alerte les sénateurs américains sur la hausse des températures et fait le lien, déjà, avec l'activité humaine.

Lise Barnéoud, journaliste



▲ « Le réchauffement climatique a commencé, annonce un expert au Sénat » titre le New York Times au lendemain de l'alerte de James Hansen.

Juin 1988. L'Amérique suffoque. L'été s'annonce brûlant. Les restrictions d'eau ont déjà commencé et les pompiers se battent contre des centaines d'incendies. Le 23, alors que le pays s'attend à vivre une terrible sécheresse, un climatologue affirme, devant des parlementaires venus l'écouter dans une chambre étouffante du Sénat, à Washington, que cette vague de chaleur n'est rien à côté de ce qui va suivre. Courbes à l'appui, il montre que l'année 1988 est la plus chaude jamais enregistrée depuis cent ans et que les modèles climatiques



prévoient une augmentation des températures comprise entre 0,1 et 0,3 °C pour chaque prochaine décennie. Ce climatologue s'appelle James Hansen. Il dirige depuis 1981 l'Institut Goddard d'études spatiales de la Nasa, le Giss, à New York. Son intervention marque l'entrée sur la scène politique du réchauffement climatique. L'événement est bien préparé, le jour judicieusement choisi: on s'attend qu'il soit l'un des plus chauds de l'année. Les fenêtres sont laissées ouvertes afin de faire entrer un maximum de chaleur. Et le discours est travaillé dans les moindres détails. En particulier, cette affirmation: ●●

●●● « La probabilité pour qu'un réchauffement de cette ampleur reflète une variabilité naturelle est d'environ 1 %. On peut donc affirmer à 99 % que le réchauffement actuel représente une tendance lourde et qu'il est lié à l'effet de serre. » Une déclaration osée pour l'époque. « Ce jour-là, James Hansen va au-delà des preuves scientifiques, confirme le climatologue français Jean Jouzel, directeur de l'Institut Pierre-Simon-Laplace, qui se trouvait dans le laboratoire du scientifique lors de son discours. *Il y est allé au culot, mais il avait raison, vingt ans en avance!* »

James Hansen sait de quoi il parle. Après avoir étudié le climat torride de Vénus, le scientifique s'intéresse à notre planète. Pour découvrir qu'à la surface du globe, les températures augmentent de manière préoccupante. L'année précédant son audition, il publie avec son équipe une analyse des températures de surface mesurées par les stations météorologiques du monde entre 1880 et 1985. Résultat : la Terre s'est globalement réchauffée d'environ 0,5 à 0,7 °C en cent ans. Et les années 1980, 1981 et 1983 sont les plus chaudes jamais enregistrées par les stations de mesure.

UNE PRISE DE POSITION CRITIQUÉE

En 1987 paraissent les premières analyses du forage dans la glace de Vostok, en Antarctique. Ces carottes glaciaires permettent d'étudier la composition gazeuse de l'atmosphère et sa température sur les derniers 160000 ans. Conclusion : il existe une étroite corrélation entre l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique et celle de la température à la surface de la Terre. Mais de là à affirmer que le réchauffement est lié, de façon quasi certaine, aux émissions de gaz à effet de serre... « *Ce n'était pas une affirmation scientifique mais une intime conviction*, analyse Valérie Masson-Delmotte, spécialiste du climat au Commissariat à l'énergie atomique. *En ce sens, James Hansen est assez unique dans le paysage très policé des scientifiques.* » D'ailleurs, nombreux sont ses collègues qui lui reprochent en public cette prise de position.

« *J'ai pesé le risque de me tromper et celui de ne pas parler*, s'est plus tard rappelé James Hansen, *et j'ai décidé qu'il fallait cesser la langue de bois.* » Une décision étonnante pour cet homme réputé timide et réservé. « *James Hansen est quelqu'un de très sérieux. Pas du tout le genre de personne à se mettre en avant. C'est sans doute pourquoi il*

est autant respecté », précise Gavin Schmidt, qui travaille dans le même laboratoire. Les jours qui suivent l'audition, la presse s'empare du sujet et transforme les propos du scientifique : elle affirme que la sécheresse que connaît le pays cet été-là est liée au réchauffement climatique, et donc aux émissions humaines. Ce concept, jusqu'alors confiné dans quelques laboratoires, se révèle un phénomène palpable, inquiétant. James Hansen devient en un été la coqueluche des médias.

Quelques mois plus tard, en novembre 1988, l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies créeront un groupe intergouvernemental d'experts afin d'étudier plus en détail l'évolution du climat : le Giec. L'audition de James Hansen et le tapage médiatique qui s'en suit ont-ils précipité la création de ce groupe ? Jean Jouzel n'écarte pas l'hypothèse.

Ces spécialistes rendront leurs premières conclusions deux ans plus tard, en 1990 : ils confirmeront la présence d'une tendance lourde au réchauffement. Ce rapport incitera alors l'ONU à établir une convention-cadre sur les changements climatiques, adoptée lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992 et ratifiée deux ans plus tard par plus de 150 pays. Mais, ironie de l'histoire, alors que les États-Unis étaient le point de départ de cette prise de conscience, ils ne ratifieront pas la Convention, et ils ne l'ont toujours pas fait.

Il faudra attendre 2007 pour que les scientifiques confirment l'intuition de James Hansen. Le dernier rapport du Giec conclut en effet que le réchauffement climatique est, à plus de 90 % de probabilité, d'origine humaine. « *L'évolution des températures ces dernières décennies a également validé les estimations de son équipe* », précise Valérie Masson-Delmotte. La décennie 1990 aura ainsi connu une augmentation des températures d'environ 0,3 °C, l'estimation haute de James Hansen. Quant à la décennie 2000, son réchauffement sera plus proche de sa fourchette basse des 0,1 °C.

Vingt ans après son discours, et une centaine d'articles scientifiques plus tard, le Sénat invitera à nouveau James Hansen. Il déclarera : « *Aujourd'hui, comme en 1988, je peux affirmer avec un degré de certitude de plus de 99 % que le réchauffement actuel est une tendance lourde, liée aux gaz à effet de serre. Seule différence avec hier : nous avons gaspillé le peu de temps qui nous restait afin de désamorcer la bombe du réchauffement climatique.* » ■

Et depuis ●●●

● 2015
L'accord de Paris sur le climat est approuvé par 195 pays présents à la COP21. Son principal objectif est de limiter la hausse des températures entre 1,5 et 2 °C en 2100.

● 2016
L'accord mondial pour une élimination progressive des hydrofluorocarbures d'ici à 2047 est signé à Kigali, au Rwanda, par 197 pays.

● 2017
Donald Trump annonce le retrait des États-Unis de l'accord de Paris.

● 2018
Le Giec publie un rapport spécial sur les 1,5 °C de réchauffement planétaire : ils pourraient être atteints d'ici à 2050 si la température augmente à son rythme actuel de 0,2 °C par décennie.

Et aussi...

De l'eau dans le manteau

2014 Il y a de l'eau sous nos pieds et potentiellement des océans! En mars 2013, lors d'une expédition au Brésil, des géologues ont récupéré des diamants dans les roches volcaniques les plus profondes, les kimberlites. À l'intérieur de l'un d'eux, un échantillon de ringwoodite, une roche qui se forme entre 520 et 660 kilomètres de profondeur, dans la zone de transition entre le manteau supérieur et le manteau inférieur. La découverte est inattendue: la ringwoodite, stable dans la zone de transition, se transforme en olivine lorsqu'elle remonte lentement à la surface. Mais, dans ce cas, le diamant a fait office de blindage de protection. Début 2014, les géochimistes ont analysé la composition chimique de l'échantillon et examiné sa façon d'absorber différents rayonnements électromagnétiques, comme les rayons X ou l'infrarouge (1). Résultat: ce fragment de ringwoodite contenait environ 1,5 % de son poids en eau. Une eau non liquide, puisque ses atomes dissocies s'insèrent dans la structure minérale de la zone de transition.



▲ Ce diamant extrait d'une roche volcanique profonde contenait de la ringwoodite, roche du manteau terrestre renfermant de l'eau.

Dans la foulée, une autre équipe issue de plusieurs universités américaines a utilisé un réseau très dense de sismographes répartis aux États-Unis. En sondant la zone de transition, ils ont obtenu des preuves cohérentes de la présence d'eau dans la zone de transition du manteau, à 410 kilomètres de la surface (2). L'eau présente dans la zone de transition pourrait représenter plus de trois fois la quantité d'eau des océans. ■

(1) D. G. Pearson *et al.*, *Nature*, 507, 221, 2014.

(2) B. Schmandt *et al.*, *Science*, 344, 1265, 2014.

La couche d'ozone sauvée à Montréal

1987 En 1974, un article signé Mario Molina et Sherwood Rowland (couronnés du prix Nobel de chimie vingt ans plus tard), de l'université de Californie à Irvine, démontre que les chlorofluorocarbones (CFC) utilisés comme gaz réfrigérant ou comme gaz

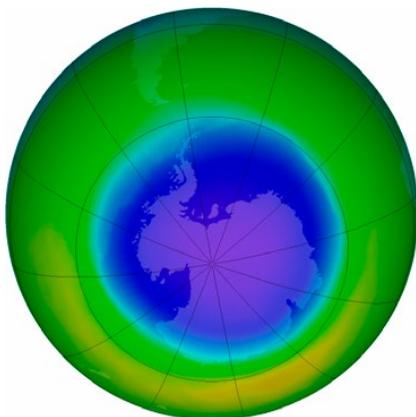
propulseur dans les aérosols détruisent l'ozone stratosphérique. L'article fait grand bruit aux États-Unis, car la disparition de l'ozone provoquerait une augmentation des cas de cancer de la peau. Quatre ans plus tard, les États-Unis, le Canada, la Suède et la Norvège interdisent les CFC dans les

aérosols. En 1985, Joe Farman et son équipe de British Antarctic Survey découvrent pourtant au-dessus de l'Antarctique ce qu'on appellera le « trou de la couche d'ozone ». En 1987, il y a consensus. Les scientifiques, les politiques, les consommateurs, ainsi que l'industrie chimique, qui a eu le temps de produire

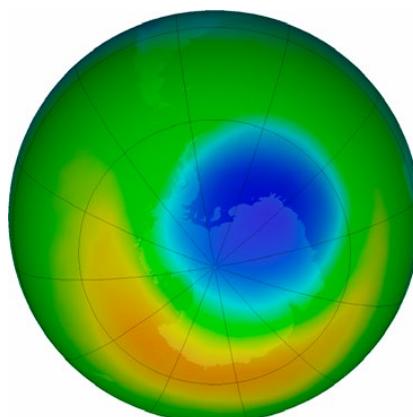
des substituts: tous sont prêts à bannir certains gaz.

À Montréal, le 16 septembre, 24 pays, ainsi que la Communauté économique européenne, signent un protocole « relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone ». C'est le premier traité environnemental mondial, qui reste l'accord cité en exemple pour toutes les négociations internationales. Il interdit la production et l'usage de certains CFC et de divers composés halogénés, dont le tétrachlorure de carbone et le bromure de méthyle. En 2019, le protocole est ratifié par 197 pays. Il a été amendé quatre fois afin d'interdire d'autres molécules ou d'accélérer le processus d'élimination. Du fait des durées de vie importantes des gaz chlorés ou bromés dans l'atmosphère, la couche d'ozone pourrait ne retrouver sa densité normale qu'après 2050. ■

Octobre 1987



Octobre 2019



▲ D'après les données satellitaires, le trou de la couche d'ozone s'est sensiblement résorbé depuis la signature du protocole de Montréal qui a interdit la production de certains gaz détruisant l'ozone stratosphérique.

Homme & Viv

Paléontologie

Lucy change le cours de l'histoire	46
Les chefs-d'œuvre révélés de la grotte Chauvet	50
Toumaï questionne les origines de l'homme	51
On a tous un peu de Neandertal	54
Homo sapiens vieillit de 100 000 ans	57
Et aussi...	60

re

ant

Biologie

Naissance du génie génétique	34
Le virus du sida enfin détecté	36
L'intestin dévoile son microbiote	39
La modification de l'ADN à la portée de tous	40
Et aussi...	44

Entre les débuts du génie génétique, l'édition du génome avec CRISPR-Cas9 et la naissance de la paléogénomique, l'étude des gènes fait reculer les frontières du vivant. En parallèle, une équipe française découvre le VIH et les neurosciences apprivoisent le cerveau.

Neurosciences

Stimuler les neurones pour adoucir la maladie de Parkinson	62
L'émergence d'une science unifiée de l'esprit	66
L'optogénétique en pleine lumière	68
Et aussi...	70

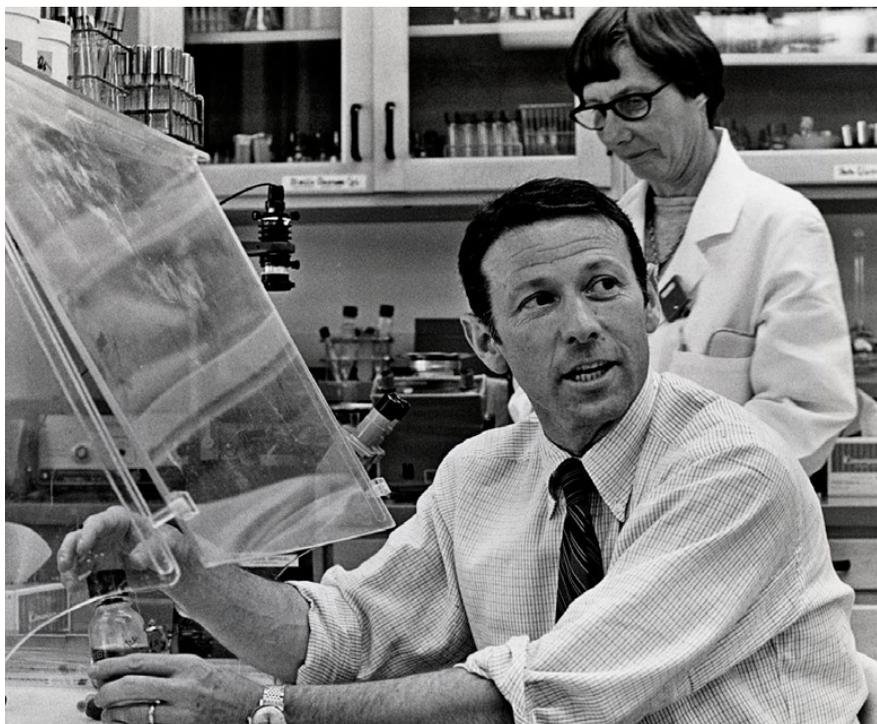
NAISSANCE DU GÉNIE GÉNÉTIQUE

Au début des années 1970, un biologiste américain réussit la première construction génétique artificielle. Les scientifiques de l'époque se réunissent alors afin d'établir des règles de sécurité pour les manipulations du génome.

Sandrine Étien, journaliste

Février 1975. Près de 150 scientifiques, juristes et journalistes se réunissent à Asilomar, en Californie, pour discuter des risques potentiels du génie génétique. Une discipline naissante au sein de laquelle les scientifiques isolent, copient et transfèrent les gènes d'un organisme à un autre. Étrangement, cette conférence est à l'initiative d'un des fondateurs de ce domaine, l'Américain Paul Berg. Un an plus tôt, ce biochimiste s'apprêtait à introduire de l'ADN de virus cancérogène dans une bactérie, lorsqu'il prit conscience qu'il était peut-être sur le point de créer une bactérie virulente pour l'homme. Il arrêta alors son travail et demanda un moratoire sur ce type d'expériences. À l'issue de la conférence, la décision de poursuivre les recherches en génie génétique est prise. Mais des règles de sécurité sont définies, tel le travail dans des laboratoires assurant un haut niveau de confinement.

Comment ont commencé ces recherches qui, pour Thierry Grange, de l'Institut Jacques-Monod, à Paris, « ont révolutionné la biologie et notre vision du vivant » ? Il faut se souvenir que, « jusqu'au début des années 1970, en raison de la taille de la molécule d'ADN, on pensait qu'il était impossible d'isoler les gènes », souligne Michel Morange, de l'École normale supérieure de Paris. Mais en 1972 une expérience bouleverse cette vision. Paul Berg, à l'université Stanford, aux États-Unis, réussit *in vitro* à découper puis à recoller ensemble des fragments d'ADN de deux



▲ En 1972, le biochimiste américain Paul Berg combine *in vitro* l'ADN de deux espèces de virus. Une première récompensée par le prix Nobel de chimie en 1980.



espèces différentes de virus (1). Le procédé est baptisé technique de l'ADN recombinant. C'est la première construction génétique artificielle, ce qui lui vaudra le prix Nobel de chimie en 1980. Il a pu combiner l'ADN de ces deux virus grâce à des « outils » découverts sept ans plus tôt : les enzymes de restriction (2). Ces protéines bactériennes sont capables de couper l'ADN comme

Et depuis ●●●

des ciseaux à des endroits précis. « *Le microbiologiste Werner Arber, de l'université de Genève, les a découvertes par hasard alors qu'il étudiait les mécanismes de défense des bactéries* », explique Michel Morange.

En 1973, un pas de plus est franchi : Herbert Boyer, de l'université de Californie à San Francisco, et Stanley Cohen, de l'université Stanford, inventent une technique permettant de sélectionner et de répliquer (*) de l'ADN d'organisme supérieur (3). Comment ? Ils ont tout d'abord, comme Paul Berg, réalisé une construction génétique : ils ont inséré un fragment d'ADN de grenouille dans une molécule d'ADN bactérien circulaire, appelée plasmide. Puis, ils ont introduit cette construction génétique dans une bactérie *Escherichia coli*. Ces bactéries se divisent toutes les vingt minutes et, chaque fois, l'ADN introduit est copié, d'où le nom de la technique : clonage de l'ADN. Le premier organisme génétiquement modifié est né ! Pour Philippe Kourilsky, professeur au Collège de France, « *cela marque un tournant en biologie : il est dès lors possible de manipuler les gènes d'organismes supérieurs.* »

DES BACTÉRIES USINES À PROTÉINES

Les biologistes commencent à imaginer les recherches qui s'ouvrent à eux. Mais certains se demandent si de telles expériences ne risquent pas de créer des organismes dangereux pour la santé, qui pourraient « s'échapper » des laboratoires. Une controverse apparaît aussi au sein de la population, surtout aux États-Unis : le génie génétique fait peur, il est perçu comme du bricolage du vivant. C'est dans ce contexte que se tient la rencontre d'Asilomar, en 1975, pour « *évaluer la validité de ces craintes*, se souvient Philippe Kourilsky. *À l'issue de la conférence, les risques ont été jugés maîtrisables* ». Les laboratoires se mettent donc aux normes pour respecter les règles de sécurité adoptées lors de la rencontre. En France, Jacques Monod, alors directeur de l'Institut Pasteur, est favorable au développement du génie génétique. « *C'est une période très excitante* », se rappelle Philippe Kourilsky, qui, en 1975, met au point avec François Rougeon et Bernard Mach une méthode qui va permettre de cloner l'ARN messager (4). Chaque gène exprimé donne naissance à une copie, l'ARN messager, qui sert de matrice à la synthèse des

2010

L'Américain Craig Venter et les biologistes de son institut, le J. Craig Venter Institute, annoncent la création de la première bactérie dotée d'un génome synthétique.

2014

L'équipe de Jef Boeke, de l'université de New York, synthétise l'un des seize chromosomes de la levure de boulanger - organisme eucaryote plus complexe qu'une bactérie - et l'insère dans une levure vivante.

2014

Des biologistes de l'Institut Scripps, en Californie, créent une lignée de bactéries au code génétique augmenté : il contient deux éléments de codage inconnus dans la nature, différents des éléments de base de l'ADN.

2017

Un garçon souffrant de drépanocytose, maladie affectant les globules rouges, est en rémission grâce à la thérapie génique LentiGlobin, appliquée par l'équipe de Maria Cavazzana à l'hôpital Necker, à Paris.

protéines. En la clonant, on a donc directement accès aux gènes qui s'expriment dans la cellule. Cela permettra de faire des découvertes fondamentales en biologie. Pour cela, les chercheurs ont synthétisé de l'ADN, appelé ADN complémentaire, à partir d'ARN messager, avant de l'introduire dans une bactérie.

La technique de clonage de l'ADN ouvre aussi la voie à un autre champ d'applications. En effet, les bactéries peuvent être utilisées comme des « usines » à produire des protéines d'intérêt médical. En 1977, une équipe de l'université de Californie à San Francisco parvient à transférer le gène de l'insuline dans des bactéries (5). « *La pression était énorme, car nous étions en compétition avec d'autres équipes*, se souvient l'un des membres de cette équipe, Raymond Pictet, maintenant à l'Institut Jacques-Monod, à Paris. *Mais cette époque était passionnante parce que cette technologie permettait de réaliser des expériences qui étaient encore récemment du domaine de la science-fiction.* »

Résultat de ces travaux : en 1982, le premier produit issu du génie génétique, l'insuline humaine produite par des bactéries génétiquement modifiées, est commercialisé pour traiter le diabète insulino-dépendant. C'est une révolution médicale. L'insuline était jusqu'alors difficile à obtenir, car elle était extraite de pancréas de veau. De plus, cela permet d'avoir un procédé industriel au coût très faible, car les bactéries productrices tiennent dans une cuve. Le public comprend dès lors l'intérêt du génie génétique.

À la fin des années 1970, d'autres protéines d'intérêt médical, telle l'hormone de croissance, sont ainsi produites dans des bactéries. « *De plus en plus de brevets sont déposés, et la biologie se met à avoir des applications directes pour l'industrie* », note Raymond Pictet. Le secteur des biotechnologies voit alors le jour et Herbert Boyer fonde, en Californie en 1976, Genentech, qui mettra au point la production industrielle de trois hormones par génie génétique. Depuis, le génie génétique a de nombreuses applications, aussi bien dans le domaine médical qu'en agronomie. ■

(1) D. A. Jackson *et al.*, *PNAS*, 69, 2904, 1972.

(2) W. Arber, *Annu. Rev. Microbiol.*, 19, 365, 1965.

(3) J. F. Morrow *et al.*, *PNAS*, 71, 1743, 1974.

(4) F. Rougeon *et al.*, *Nucleic. Acids Res.*, 2, 2365, 1975.

(5) A. Ulrich *et al.*, *Science*, 196, 1313, 1977.

(*) **La réplication** est le processus au cours duquel une nouvelle molécule d'ADN est synthétisée à partir de la molécule originale.

ENTRETIEN AVEC **FRANÇOISE BARRÉ-SINOUSSE**

LE VIRUS DU SIDA ENFIN DÉTECTÉ

Une fois le virus du sida identifié par l'équipe de Françoise Barré-Sinoussi, les efforts se concentrent sur le décryptage de ses mécanismes complexes.

Propos recueillis par **Sophie Coisne**

La Recherche Les années 1980 sont souvent appelées les « années sida ». Pourquoi cette maladie a-t-elle tant marqué cette décennie ?

Françoise Barré-Sinoussi Parce que nous avons pris conscience que nous n'étions pas à l'abri de nouvelles épidémies d'origine infectieuse, y compris dans les pays riches. C'était une maladie qui touchait des sujets jeunes, entre 25 et 35 ans, et qui frappait à la fois des pauvres et les classes intellectuelles. Toutefois, quand la maladie a été découverte, on a avant tout parlé des homosexuels. Le sida avait d'abord été baptisé « maladie des quatre H » : homosexuels, hémophiles, Haïtiens et héroïnomanes. Beaucoup estiment encore que cette maladie touche essentiellement les homosexuels et les héroïnomanes. Ils refusent d'entendre que 80 % des contaminations concernent les hétérosexuels. Cela me met en colère.

Une fois cette maladie découverte, quelle a été la priorité ?

La priorité était bien sûr de découvrir l'agent responsable, puis, après l'identification du virus, de mettre au point un test de dépistage. On savait en effet comment l'agent infectieux se transmettait. Il se disséminait par voie sexuelle car les homosexuels se contaminaient entre eux et des femmes dont le partenaire était malade s'infectaient elles aussi. On savait que l'agent pathogène était véhiculé par le sang car il pouvait être transmis de la mère à l'enfant,

il touchait les héroïnomanes s'échangeant les seringues et les hémophiles utilisant des dérivés sanguins. C'est l'identification de la maladie chez ces derniers qui a mis les scientifiques sur la piste d'un virus. Car la fabrication des dérivés du sang destinés aux hémophiles passait à l'époque par l'utilisation de filtres que seuls les virus pouvaient traverser, et non les bactéries ou les champignons. Le test de dépistage, fondé sur la détection d'anticorps contre le virus dans le sang, sera mis au point en France en 1985, deux ans après la découverte du virus.

Justement, comment le virus a-t-il été découvert ?

Entre 1981 et 1983, tous les virus présents chez les homosexuels et les drogués ont été examinés : virus des hépatites, de l'herpès... Aucun ne correspondait aux symptômes observés (défenses immunitaires affaiblies, pathologies rares et graves, telles que le sarcome de Kaposi). C'est alors que des collègues cliniciens, Willy Rozenbaum, de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, et Françoise Brun-Vezinet, de l'hôpital Bichat, nous ont contactés et ont évoqué la piste des rétrovirus (*). Ce qui était tout sauf un hasard. Le virologue américain Robert Gallo, de l'Institut national américain du cancer, venait en effet de découvrir un rétrovirus, le HTLV-1, qui infectait des globules blancs, les lymphocytes T, chez des patients présentant une leucémie. Les cliniciens se sont donc demandé si un virus de ce type pouvait être responsable du sida, dans





FRANÇOISE BARRÉ-SINOUSSE

1947 Elle naît à Paris.

1971 Après une maîtrise de biochimie, elle intègre le laboratoire de Jean-Claude Chermann à l'Institut Pasteur.

1974 Elle obtient un doctorat d'État en virologie.

1976 Elle est recrutée à l'Inserm et

travaille à l'Institut Pasteur.

1983 Avec Luc Montagnier, elle observe pour la première fois le virus du sida à partir de biopsies ganglionnaires d'un malade.

1988 Elle est chef du laboratoire de biologie des rétrovirus et lance des

programmes de recherche sur les déterminants du virus et de l'hôte développeur de la maladie.

2008 Elle obtient le prix Nobel de médecine avec Luc Montagnier.

DEPUIS 2017 Elle préside l'association Sidaction.

lequel on voyait disparaître les lymphocytes T. Ils se sont adressés à nous pour le vérifier. Nous étions en effet une des rares équipes dans le monde à travailler encore sur les rétrovirus.

Quelle démarche avez-vous adoptée pour le détecter ?

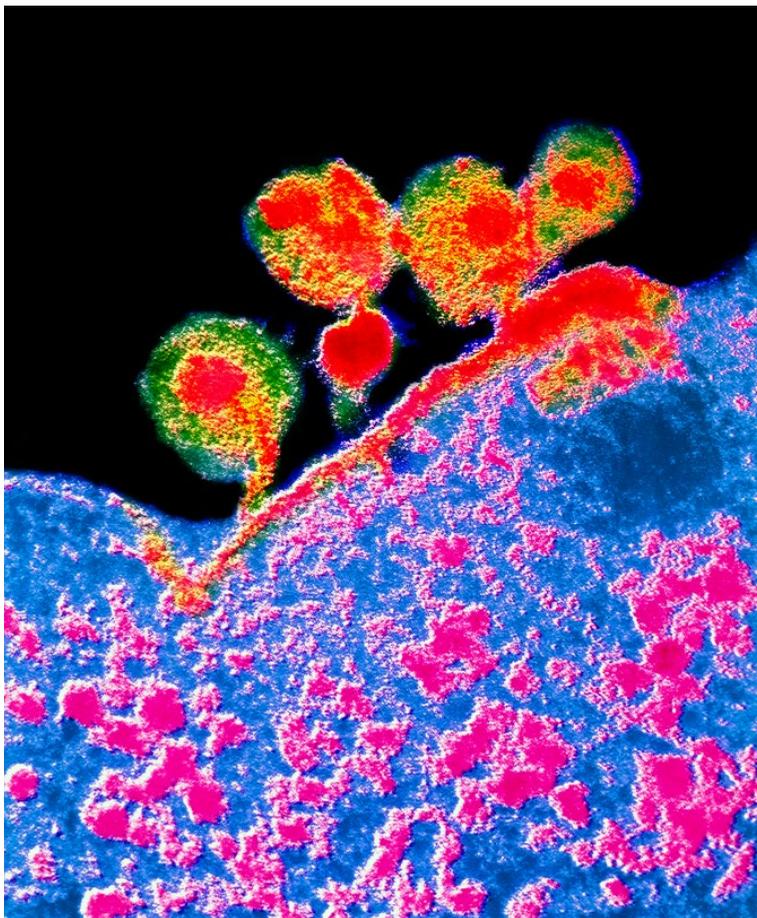
Nous avons décidé de rechercher, dans une culture de lymphocytes T, la présence d'une enzyme caractéristique des rétrovirus, la *reverse transcriptase*. L'autre décision importante a été de ne pas chercher le virus chez un patient atteint du sida : en fin de maladie, il n'a presque plus de lymphocytes T, dits CD4, dans lesquels se niche le virus. Nous sommes plutôt partis des lymphocytes d'un patient souffrant d'un stade moins avancé de la maladie, une lymphadénopathie

généralisée. Une fois ses lymphocytes en culture, il nous a fallu quinze jours pour repérer l'activité du virus. Nous l'avons alors appelé LAV, pour *Lymphadenopathy Associated Virus*.

La communauté scientifique a-t-elle alors imaginé trouver rapidement un vaccin ?

Oui, nous avons été extrêmement naïfs, pensant qu'il y aurait rapidement un traitement et un vaccin. Sur un plan plus fondamental, nous étions loin d'imaginer ce qu'étaient réellement les interactions entre ce virus et les cellules auxquelles il s'attaque. À l'époque, on croyait qu'il n'infestait que les lymphocytes T CD4. En culture, on voyait que le virus les tuait. Et on pensait avoir alors tout compris ! Vingt-sept ans plus tard, nous sommes encore loin d'appréhender ●●

(*) Un rétrovirus est un virus dont le matériel génétique est sous forme d'ARN. Pour se multiplier, il transforme cet ARN en ADN grâce à une enzyme, la *reverse transcriptase*.



▲ Sur ce lymphocyte se forment des bourgeons qui vont libérer le virus dans l'organisme.

●●● tous les mécanismes de disparition des lymphocytes chez le malade. On sait que le lymphocyte T CD4 n'est pas la seule cible du virus du sida : d'autres cellules du système immunitaire sont touchées et elles se trouvent aussi dans de nombreuses régions de l'organisme : le cerveau, la muqueuse intestinale...

S'il ne fallait garder qu'un élément marquant de ces années sida, lequel serait-ce selon vous ?

J'en garderai deux : la mise au point du test de dépistage et celle du traitement. C'est le gros progrès. Il n'a fallu que deux ans après la découverte du virus pour que l'on ait en main un premier médicament contre le sida, l'AZT, avec un mieux pour les malades. On s'est hélas vite aperçu que le virus des patients sous AZT finissait par muter et résister au traitement. Et il a fallu attendre 1996 pour que l'on montre l'efficacité des trithérapies, autrement dit de la combinaison de trois traitements différents contre le virus. Aujourd'hui, la

mortalité des patients a diminué de plus de 85 %. Une autre grande avancée a été la prévention, au début des années 1990, de la transmission du sida de la mère à l'enfant. Aujourd'hui, ce type de transmission est quasi inexistant en Europe. C'est un progrès significatif, même si on aimerait qu'il soit universel.

Sur quel aspect de l'infection portez-vous votre attention aujourd'hui ?

Nous focalisons notre attention sur les 96 heures qui la suivent. Ce sont elles en effet qui vont déterminer l'évolution ou non du séropositif vers un sida dix ou onze ans plus tard en l'absence de tout traitement. On sait que les premières interactions entre le virus et les cellules immunitaires altèrent l'immunité spécifique. Mais l'infection touche aussi l'immunité innée, qui est la première défense de l'organisme contre les agents pathogènes.

Le fait que l'on soit parvenu, pour la première fois en 2009, à protéger des Thaïlandais de l'infection à l'aide d'un vaccin stimule-t-il la recherche ?

Rappelons qu'il y a eu peu de personnes infectées dans cet essai, et donc que la protection a été évaluée sur un petit nombre de volontaires vaccinés. Elle n'était que de 31,2 %. En fait, cet essai pose beaucoup de questions. La stratégie est-elle la bonne ? Comme la protection est insuffisante, peut-on l'améliorer en modifiant le protocole vaccinal ? Quels sont les mécanismes de protection qu'ont su développer les personnes protégées ? On ne va pas répondre à toutes les questions avec cet essai. C'est pourquoi il est important de continuer les recherches sur le petit nombre de personnes infectées depuis plus de dix ans qui contrôlent naturellement la multiplication du virus sans traitement, ou sur des singes d'Afrique infectés mais qui ne développent pas le sida. ■

Et depuis ●●●

2012

Pour la première fois, un traitement préventif dit PrEP (prophylaxie pré-exposition), le Truvada, est autorisé aux États-Unis afin de protéger les personnes saines risquant une contamination.

2019

Un deuxième cas de rémission totale est annoncé chez un malade atteint par le VIH - le « patient de Londres ». Il fait suite au « patient de Berlin » considéré comme guéri depuis douze ans.

ENTRETIEN AVEC **JOËL DORÉ**

L'INTESTIN DÉVOILE SON MICROBIOTE

Joël Doré, chercheur à l'Inrae, a participé à un projet de séquençage de l'ADN du microbiote intestinal qui a permis de répartir les individus en trois groupes distincts.

Propos recueillis par **Marine Cygler**

La Recherche La flore intestinale des humains permet-elle de les différencier les uns des autres ?

Joël Doré Elle permet en tout cas de les classer en trois catégories. Nous venons de le découvrir dans le cadre du projet international MetaHIT. Lancé en 2008, MetaHIT consiste à séquencer et à analyser l'ADN de l'ensemble des bactéries du tube digestif de dizaines de personnes, avec pour objectif final de mieux comprendre le rôle de cette flore – ou « microbiote » – dans l'organisme. Dans le cas présent, nous avons analysé l'ADN bactérien de 39 volontaires de trois continents différents. Et nous avons constaté qu'on pouvait répartir ces individus en trois groupes, indépendamment de leur origine géographique, de leur sexe, de leur âge, ou de leur état de santé (1). Ces trois groupes sont nommés « entérotypes ».

Quelles sont les particularités de ces trois groupes ?

L'analyse génétique nous indique quelles familles bactériennes, quels genres, voire quelles espèces sont présents chez chaque personne. Ce qui change selon les trois entérotypes, c'est d'abord l'abondance relative des familles présentes. Schématiquement, dans le premier, la famille principale est celle des *Bacteroidaceae*, dans le deuxième, les *Prevotellaceae*, dans le troisième, les *Ruminococcaceae*. Par ailleurs, la distinction entre entérotypes se fait aussi selon les fonctions codées par les gènes bactériens. Par exemple, une plus ou moins grande capacité à utiliser les fibres des aliments comme source d'énergie, ou à produire du méthane.

Ce résultat est-il surprenant ?

Oui, nous nous attendions plutôt à voir des variations plus homogènes dans la diversité et l'abondance des espèces bactériennes intestinales au sein de la population. On n'imaginait pas pouvoir distinguer trois groupes. D'ailleurs, les scientifiques chargés d'évaluer notre article ont d'abord accueilli avec circonspection ces résultats très originaux. À leur demande, nous avons approfondi nos analyses statistiques, qui les ont convaincus du bien-fondé de nos conclusions. Pour le moment, nous n'avons pas d'explication sur la façon dont se forment ces entérotypes. Il est possible qu'ils aient un lien avec le patrimoine génétique de l'hôte : les muqueuses de l'intestin présenteraient des sites de reconnaissance pour certaines bactéries. Il est aussi possible qu'ils dépendent des bactéries rencontrées à la naissance et durant les premières années de vie, pendant lesquelles le microbiote se met en place.

Plusieurs études montrent une corrélation entre la flore intestinale et l'obésité.

Comment concilier ces résultats avec votre étude ?

Nous savons qu'il y a une corrélation entre la présence ou l'absence de certaines espèces bactériennes, et l'obésité. Mais comme le concept d'entérotipe est complètement nouveau, la comparaison entre les entérotypes d'individus sains et obèses n'a pas encore été effectuée. Pour savoir si un entérotipe confère un risque accru de développer une maladie ou, au contraire, constitue une protection, il faudra travailler sur de plus grandes cohortes. ■

(1) M. Arumugam *et al.*, *Nature*, 473, 174, 2011.



DEPUIS 2010 Il est directeur de recherche à l'Inrae.

2017 Il est lauréat du Grand Prix Inra de la recherche agronomique.

Et depuis ●●●

● 2017

À l'université de Pennsylvanie, l'équipe de Marc Kahn découvre que des bactéries du microbiote intestinal favorisent chez la souris le développement d'anomalies sur les vaisseaux sanguins du cerveau.

LA MODIFICATION DE L'ADN À LA PORTÉE DE TOUS

En associant une séquence d'ADN dite CRISPR à une enzyme découpeuse appelée Cas9, on peut éditer plus facilement qu'auparavant le génome de cellules.

Jean-Philippe Braly, journaliste

« Je ne serais pas surpris que cette innovation révolutionnaire soit très vite récompensée par un Nobel », lançait récemment Alain Fischer, de l'hôpital Necker, à Paris, spécialiste français de thérapie génique – un ensemble de traitements qui corrigent directement chez les patients des gènes défectueux à l'origine de maladies. L'innovation en question ? Une technique de génie génétique, aussi efficace que son nom est imprononçable : CRISPR-Cas9, mise au point en 2012. Alain Fischer n'est pas le seul à s'enthousiasmer : le jury du prix Breakthrough a récompensé en novembre 2014 Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna, qui ont reçu chacune 3 millions de dollars pour cette découverte.

En à peine deux ans, des équipes du monde entier se sont approprié CRISPR-Cas9 pour modifier le génome de nombreux types de cellules, tant chez les bactéries que chez les plantes ou chez les animaux, avec une facilité déconcertante. Et, en 2014, la technologie a franchi deux nouvelles étapes. D'abord, elle s'est révélée utilisable sur des primates. Ensuite, elle a permis de corriger des maladies génétiques *in vivo* sur des souris.

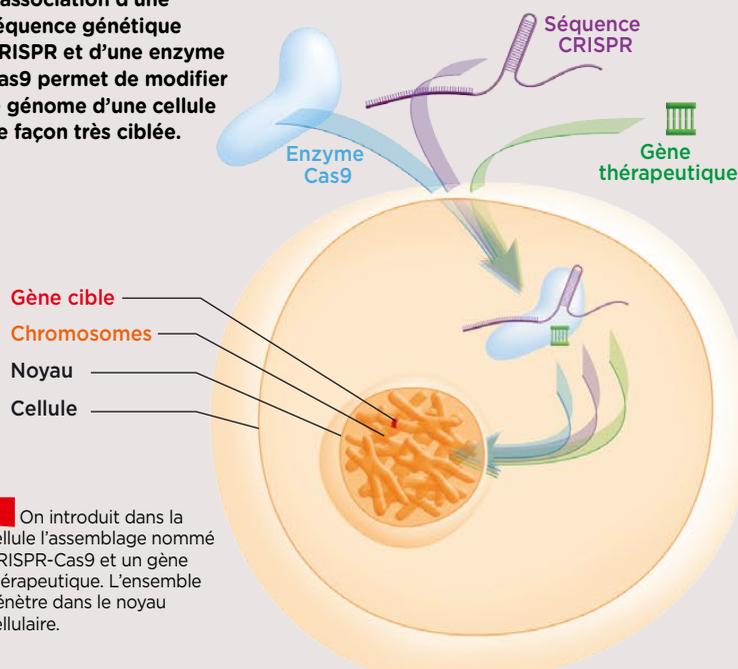
CRISPR-Cas9 tire son origine d'études très fondamentales du génome bactérien. En 1987, Atsuo Nakata et son équipe de l'université d'Osaka, au Japon, découvrent de curieuses séquences d'ADN répétitives dans le génome de bactéries *Escherichia coli* (1). Dans certaines parties de ces séquences, les quatre « lettres » constitutives de l'ADN forment des suites identiques dans un sens de lecture ou dans l'autre, comme des palindromes. Ces séquences énigmatiques suscitent toutefois peu d'intérêt. Pour preuve,

ce n'est qu'en 2002 qu'on les baptisera officiellement CRISPR (acronyme anglais pour « courtes répétitions en palindrome regroupées et régulièrement espacées »). En 2005, tout de même, des bio-informaticiens découvrent que les morceaux d'ADN intercalés entre ces palindromes sont souvent des séquences d'ADN de virus. En 2007, des chercheurs de l'industriel laitier danois

INFOGRAPHIE - SYLVIE DESSERT

Fig. 1 Une technique très ciblée

L'association d'une séquence génétique CRISPR et d'une enzyme Cas9 permet de modifier le génome d'une cellule de façon très ciblée.



1 On introduit dans la cellule l'assemblage nommé CRISPR-Cas9 et un gène thérapeutique. L'ensemble pénètre dans le noyau cellulaire.

Danisco comprennent que lorsque les bactéries qu'ils utilisent pour fabriquer des yaourts et des fromages ont des séquences CRISPR, elles survivent mieux aux infections virales. « *Il s'agit d'une sorte de système immunitaire capable de garder la mémoire d'une agression par un virus ou une séquence d'ADN étrangère, afin de combattre ce même agresseur lorsqu'il envahit à nouveau la bactérie* », résume Christine Pourcel, de l'Institut de génétique et microbiologie d'Orsay, qui a participé à cette découverte.

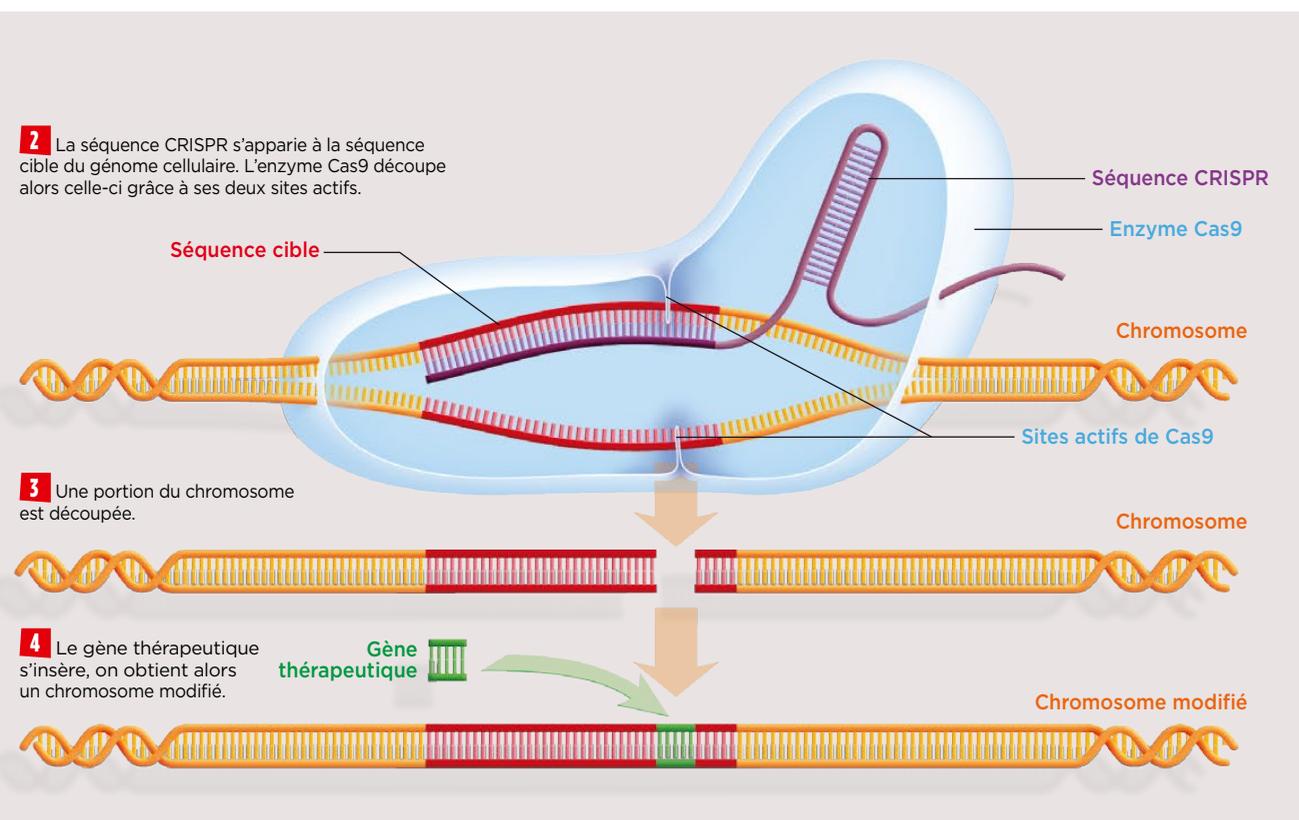
Bref, les CRISPR agiraient comme une sorte de vaccin. Restait à comprendre comment. Plusieurs microbiologistes à travers le monde vont s'y atteler. Parmi eux, la Française Emmanuelle Charpentier, qui travaille alors à l'université suédoise d'Umeå. Avec son équipe, elle va contribuer au décryptage d'un des principaux mécanismes mis en jeu. Comme pour n'importe quel gène, chaque séquence CRISPR, qui contient donc de l'ADN viral, est transcrite en plus petites molécules intermédiaires, des ARN, qui comportent la séquence complémentaire de l'ADN viral. Mais plutôt que d'être ensuite

traduits en protéines, ces ARN vont se lier à une enzyme découpeuse d'ADN nommée Cas9. Si cette structure rencontre l'ADN correspondant d'un virus dans la cellule, l'ARN s'y apparie et la Cas9 le coupe en deux. Toutefois, le mécanisme permettant l'accès à l'un des deux brins de l'ADN viral n'est pas encore bien élucidé. En attendant, le système constitue un redoutable attelage pour détecter facilement une séquence d'ADN donnée, puis la découper avec précision.



AUSSI SIMPLE QUE RAPIDE

Ces caractéristiques en feraient un outil rêvé de génie génétique : on pourrait l'utiliser pour supprimer un gène et ainsi découvrir sa fonction ; on pourrait aussi éliminer un gène néfaste ou déficient. Il suffirait de fabriquer en laboratoire un « ARN guide » correspondant au gène que l'on souhaite cibler, puis de l'arrimer à une enzyme Cas9. Cette dernière découperait alors le gène. C'est précisément ce qu'Emmanuelle Charpentier réussit à faire *in vitro* en 2012, en s'alliant avec sa consœur Jennifer Doudna, ●●●





●●● de l'université de Californie à Berkeley (2). Ce résultat a immédiatement enflammé les généticiens du monde entier. Il faut dire que CRISPR-Cas9 possède plusieurs atouts de taille par rapport aux meilleures enzymes découpeuses d'ADN (les nucléases) développées avant lui : nucléases à doigts de zinc (ZFN), nucléases « TALEN », etc.

Premier atout : la simplicité. En effet, pour se lier à l'ADN cible, ces nucléases concurrentes nécessitent la fabrication de fragments protéiques sur mesure pour chaque gène ciblé, une opération très complexe, notamment à cause de la longueur des fragments protéiques à créer. Tandis qu'avec CRISPR-Cas9, il suffit de fabriquer de petits ARN, une technique déjà utilisée en routine dans les laboratoires de recherche du monde entier, par exemple pour faire synthétiser telle ou telle protéine dans une cellule, ou pour perturber le fonctionnement de gènes. Et en utilisant plusieurs ARN guides, diverses équipes ont très facilement réussi à cibler plusieurs gènes à la fois, y compris dans des cellules humaines.

Deuxième atout majeur : la rapidité, liée à la simplicité du système. « La mise au point d'un CRISPR-Cas9 prêt à cibler un gène particulier prend une à deux semaines tout compris, contre un à deux mois avec une ZFN ou une TALEN », indique Tuan Huy Nguyen, chercheur Inserm au Centre de recherche en transplantation et

▲ La Française Emmanuelle Charpentier (à gauche) et l'Américaine Jennifer Doudna ont mis au point le système d'édition du génome CRISPR-Cas9.

immunologie (CRTI) de Nantes. Troisième atout enfin, qui n'est pas le moindre, CRISPR-Cas9 est au minimum dix fois moins coûteux que ses concurrents, l'obtention d'ARN sur mesure faisant appel à des techniques de routine en biologie moléculaire.

« En théorie, cette technique ne permet ni de cibler plus de zones du génome ni de le faire plus précisément, tempère Ignacio Anegón, également au CRTI de Nantes, où il utilise CRISPR-Cas9 pour créer des rats génétiquement modifiés. Mais en pratique, en simplifiant le génie génétique et en le rendant accessible à n'importe quel laboratoire, la technique a fait exploser le nombre d'études. Cette démocratisation s'est en effet vite concrétisée par une déferlante de publications confirmant son efficacité sur un très grand nombre de génomes de bactéries, mais aussi d'animaux et de végétaux. CRISPR-Cas9 fonctionne avec la même facilité sur les génomes plus complexes des cellules eucaryotes, où l'ADN est recroquevillé dans un noyau. » Les scientifiques commencent tout juste à entrevoir les mécanismes très complexes mis en jeu par CRISPR-Cas9 pour y parvenir, mais en tout cas, ça marche !

STIMULER L'EXPRESSION D'UN GÈNE

Ainsi, en janvier 2013, quatre équipes annoncent avoir réussi à détruire des gènes cibles dans des cellules humaines. Les applications vont alors s'enchaîner à un rythme effréné et avec succès pour modifier des gènes d'organismes variés : bactéries, levures, riz, mouches, nématodes, poissons zèbres, rongeurs, etc. Et certains chercheurs modifient légèrement la technique pour que la Cas9 ne coupe pas le gène cible, mais stimule son expression, l'inhibe ou le remplace par un autre... transformant l'outil en une sorte de couteau suisse génétique (Fig. 1). En 2014, l'outil a franchi deux caps importants : son premier succès sur des

« Une déferlante de publications a confirmé son efficacité sur un grand nombre de génomes »

Ignacio Anegón, chercheur en immunologie

primates, et sa capacité à corriger des maladies génétiques sur des souris. Le premier résultat a été présenté en février par Jiahao Sha, de l'université médicale de Nanjing, en Chine (3).

Dans des embryons de macaques asiatiques encore constitués d'une seule cellule, son équipe a injecté cinq ARN guides conçus pour cibler simultanément cinq zones réparties sur trois gènes particuliers, ainsi que le matériel génétique nécessaire à la synthèse de Cas9. Ils ont observé que, chez huit embryons ainsi traités, CRISPR-Cas9 avait réussi à agir sur deux des trois gènes cibles. Puis les biologistes ont recommencé l'opération sur 86 autres embryons qu'ils ont transférés dans 29 femelles porteuses. À la publication de l'étude, une seule femelle était arrivée à terme. Elle avait donné naissance à des jumeaux chez lesquels CRISPR-Cas9 avait aussi agi simultanément sur deux des trois gènes.

UN POTENTIEL MÉDICAL EN DEVENIR

« Ce résultat montre que CRISPR-Cas9 pourrait être utilisé pour générer des primates modèles de maladies humaines, ce qui constituerait une avancée importante », commente Tuan Huy Nguyen. Enfin, les chercheurs n'ont détecté aucune mutation sur le reste du génome. Un résultat de bon augure si l'on veut un jour utiliser CRISPR-Cas9 pour corriger des cellules humaines malades en laboratoire, avant de les réimplanter aux patients.

Mais c'est surtout fin mars 2014 qu'une équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, a concrétisé le potentiel médical de CRISPR-Cas9 (4). Ces biologistes l'ont utilisé sur la souris pour corriger la tyrosinémie (*), une maladie génétique incurable du foie, liée à une mauvaise dégradation de la tyrosine, un acide aminé. À des souris malades adultes, l'équipe a injecté trois ARN guides ciblant trois séquences d'ADN liées à la mutation, le gène de la Cas9 et le gène sain. Résultat : environ 0,5 % des cellules du foie, les hépatocytes, ont correctement incorporé le gène sain à la place du gène déficient. Trente jours plus tard, ces cellules redevenues saines ont commencé à proliférer et à remplacer les cellules malades, pour finalement représenter environ un tiers de tous les hépatocytes. Une proportion suffisante pour que les souris survivent malgré l'arrêt du

médicament de référence qui réduit la production de tyrosine. En août dernier, c'est une autre maladie génétique incurable qui a subi la loi de CRISPR-Cas9 : la myopathie de Duchenne. Cette dégénérescence des muscles est due à des mutations sur le gène codant la dystrophine, protéine indispensable au bon fonctionnement des fibres musculaires. Menée à l'université du Texas, aux États-Unis, une étude a porté sur de jeunes embryons de souris juste après fusion de l'ovule et du spermatozoïde, chez lesquels le gène de la dystrophine avait été muté pour mimer la maladie (5).

L'équipe leur a injecté un ARN guide ciblant le gène muté, la Cas9, et un gène destiné à corriger la mutation. Puis les embryons ont été implantés dans des mères porteuses. Elles ont donné naissance à des souris que les chercheurs ont élevées pendant neuf mois. Chez celles dont le taux de cellules correctement corrigées par CRISPR-Cas9 atteignait au moins 40 %, les muscles étaient normaux. « Ces études sur des souris constituent les premières preuves in vivo que CRISPR-Cas9 est capable de corriger des maladies génétiques », commente Tuan Huy Nguyen. Pourrait-on alors utiliser CRISPR-Cas9 sur l'homme ? Il faudra d'abord franchir plusieurs étapes. « Le point critique sera de confirmer que ce système n'induit pas de lésions dans d'autres régions du génome », prévient Alain Fischer. Et afin d'obtenir un effet thérapeutique, il faudra aussi optimiser la fréquence à laquelle les cellules ciblées sont corrigées. Voilà pourquoi les recherches vont bon train pour développer des moyens capables de mieux faire pénétrer CRISPR-Cas9 dans les cellules : nanoparticules, Cas9 plus petites, etc.

D'autres applications pourraient toutefois voir le jour : lutte contre les bactéries résistantes aux antibiotiques, applications en agriculture, en virologie, en pharmacie... « Cette technologie concerne tous les domaines de recherche en biologie ! » résume Alain Fischer. « Dérivée d'études très en amont sur les bactéries, cette invention montre l'importance de continuer à investir dans la recherche fondamentale », conclut Emmanuelle Charpentier. ■

(1) Y. Ishino et al., *J. Bacteriol.*, 169, 5429, 1987.

(2) M. Jinek et al., *Science*, 337, 816, 2012.

(3) Y. Niu et al., *Cell*, 156, 836, 2014.

(4) H. Yin et al., *Nat. Biotechnol.*, 32, 551, 2014.

(5) C. Long et al., *Science*, 345, 1184, 2014.

(*) **La tyrosinémie** est une maladie génétique qui génère une accumulation de déchets endommageant le foie.

Et depuis ●●●

- 2015
Au Royaume-Uni, un enfant de 11 mois atteint de leucémie est guérie avec des globules blancs génétiquement modifiés par l'entreprise **Collectis** pour tuer des cellules cancéreuses.
● L'équipe d'Anthony James, à l'université de Californie, utilise le forçage génétique - ou système « gene drive » - pour répandre, dans une population de moustiques, une mutation qui les protège du parasite agent du paludisme.
- 2019
Le Chinois He Jiankui est condamné à trois ans de prison pour avoir modifié, avec CRISPR-Cas9, les embryons de jumelles nées en 2018, pour les immuniser contre le virus du sida.

Et aussi...

Louise Brown, premier bébé-éprouvette

1978 Elle s'appelle Louise Brown. Née le 25 juillet 1978, elle est le premier bébé conçu en éprouvette. Réalisée par l'embryologiste britannique Robert Edwards, cette fécondation in vitro, ou FIV, est le fruit d'un travail commencé en 1965.

Dans son laboratoire de l'université de Cambridge, Robert Edwards cherchait un gynécologue qui puisse lui fournir des ovocytes. Il convainc un obstétricien de l'hôpital d'Oldham, Patrick Steptoe, d'expérimenter la FIV avec lui. Ce dernier pratiquait une nouvelle technique chirurgicale gynécologique, la « cœlioscopie », qui permettait de prélever des ovocytes. Mais toute la technique était à inventer : comment



▲ Louise Brown, ici à l'âge de 1 an avec ses parents, est le premier bébé conçu par FIV.

ponctionner les ovocytes, déterminer le bon moment pour l'ovulation, le bon milieu pour la fécondation, réaliser l'implantation de l'embryon dans l'utérus, etc. Et expérimenter tout cela avec des femmes acceptant de jouer le jeu sans réussite garantie. Pendant des années, des prélèvements étaient réalisés à l'hôpital d'Oldham et transférés à Cambridge, à près de 300 km, pour fécondation. Puis des embryons étaient renvoyés à Oldham pour implantation. Tout cela se déroulait dans un contexte hostile. Leurs travaux étaient très critiqués d'un point de vue éthique, mais aussi d'un point de vue scientifique : on pensait qu'ils auraient dû commencer par réaliser une FIV chez le singe avant de passer à l'homme. ■



▲ Isabelle Dinoire a bénéficié d'une greffe partielle du visage.

La prouesse de la greffe du visage

2005 Le 28 novembre 2005, six mois après avoir été défigurée par son chien, Isabelle Dinoire, 38 ans, subit une opération de plus de quinze heures. Elle retrouve un visage grâce à une greffe partielle du nez, de la bouche et du menton. Cette première mondiale a été réalisée au

CHU d'Amiens par l'équipe de Bernard Devauchelle, spécialiste de chirurgie maxillo-faciale, avec celle de Jean-Michel Dubernard, du CHU de Lyon, pour la partie immunologique. Cinq ans après, Isabelle Dinoire avait retrouvé la motricité et la sensibilité de son visage, avant de décéder en 2016. ■

Le génome humain déchiffré

2000 En 1985, le département américain de l'Énergie envisage de séquencer le génome humain, c'est-à-dire de déchiffrer des fragments de génome séparément puis de les assembler pour former l'ADN complet. Avec un objectif : déterminer les séquences génétiques de l'irradiation. Cela devient réalisable cinq ans plus tard, grâce à la mise au point des machines capables d'automatiser le séquençage de l'ADN. En 1990, le projet public international « Génome humain » (vingt laboratoires dans six pays : États-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, Japon, Chine et France), conduit par l'Institut national de la santé aux États-Unis, est lancé. Il prévoit de parvenir à une séquence complète en quinze ans. Puis, en 1996, le consortium fixe un objectif ambitieux : obtenir une séquence complète avec une précision de 99,99 %, ce qui permet de détecter des mutations sur les gènes. En 1998, Craig Venter, de la société biotechnologique américaine Celera Genomics, annonce pouvoir séquencer le génome humain en trois ans ! La firme va utiliser une stratégie de séquençage sans cartographie préalable et compléter ses données avec celles produites par le consortium. L'entreprise affiche l'intention de vendre l'accès aux données de la séquence. Le consortium public décide donc d'accélérer ses travaux. Résultat : en juin 2000, il achève, en même temps que Celera Genomics, le séquençage de 90 % du génome, cinq ans plus tôt que prévu (1). Mais il reste environ 150 000 « trous » à combler. S'ensuit un fastidieux travail de finition qui s'achève en avril 2003 avec l'obtention d'une séquence complète de haute qualité (2). ■

(1) International Genome Sequencing Consortium, *Nature*, 409, 860, 2001 ; J. C. Venter *et al.*, *Science*, 291, 1304, 2001.

(2) International Genome Sequencing Consortium, *Nature*, 431, 931, 2004.

Dolly, un clone devenu star

6 En février 1997, télévisions, journaux et magazines n'ont d'yeux que pour Dolly, une jeune agnelle née sept mois plus tôt, le 5 juillet 1996, dans les locaux de l'Institut Roslin, près de la ville écossaise d'Édimbourg. Et pour cause: l'animal n'est pas le fruit de l'accouplement d'une brebis et d'un mouton, ni même de la fécondation d'un ovocyte par un spermatozoïde après insémination. Elle n'a pas de père et est la copie génétique de sa mère, autrement dit son clone! Certes, Dolly n'est pas le premier mammifère cloné. Mais ceux qui l'ont précédée ont été obtenus à partir de cellules embryonnaires. La brebis écossaise, elle, a été produite à partir d'une cellule adulte différenciée. Ce que l'on pensait impossible. Ian Wilmut et ses collègues de l'Institut Roslin ont transféré dans un ovocyte énucléé de brebis le noyau d'une cellule de glande mammaire

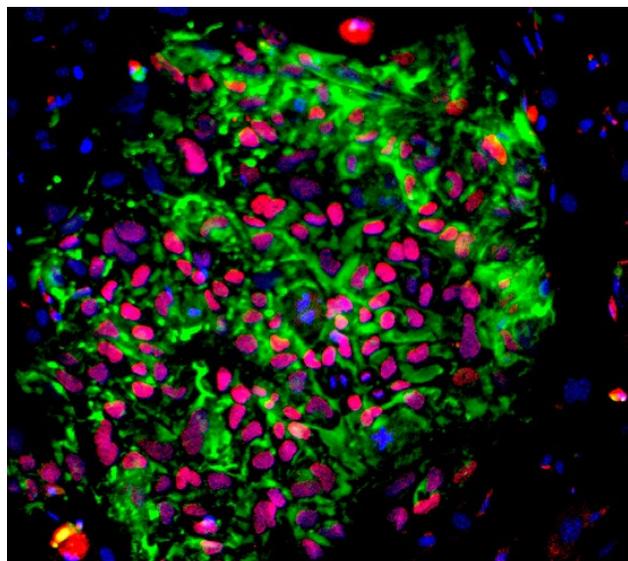
prélevée sur une femelle adulte de race Finn Dorset. Après quelques savantes manipulations, l'embryon ainsi formé a été implanté dans l'utérus d'une troisième femelle Scottish Blackface. Cent cinquante jours plus tard, Dolly naissait (1).

Les chercheurs écossais sont parvenus à cet exploit en harmonisant le rythme de division du noyau transféré et le cycle du cytoplasme (la solution visqueuse qui emplit la cellule et dans laquelle baigne le noyau) de l'ovocyte récepteur. D'une part, les cellules donneuses ont été plongées dans une solution saline contenant juste assez de nutriments pour les laisser en vie tout en arrêtant leur croissance. D'autre part, l'ovocyte énucléé a été stimulé grâce à des impulsions électriques de façon à ce que son cytoplasme libère du calcium intracellulaire, comme le ferait un spermatozoïde au moment de la fécondation. ■

(1) I. Wilmut *et al.*, *Nature*, 385, 810, 1997.



▲ En février 1997, la brebis clonée Dolly fascinait le monde entier.



▲ Ces cellules souches capables de donner n'importe quel type cellulaire de l'organisme ont été obtenues à partir des cellules de peau.

Des cellules adultes rajeunies in vitro

7 En novembre 2007, l'équipe de Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto, au Japon, publie un article qui fait l'effet d'une bombe. Les biologistes ont transformé des cellules de peau d'une femme de 36 ans en cellules indifférenciées capables, à l'égal des cellules d'un embryon, de donner n'importe quel type cellulaire de l'organisme. Shinya Yamanaka les nomme « cellules iPS », pour « cellules souches pluripotentes induites » (1). Le procédé permet d'obtenir des cellules souches « embryonnaires » sans avoir à détruire des embryons. Qui plus est, les cellules iPS ont le même patrimoine génétique que l'adulte dont elles descendent. Une publication de Shinya Yamanaka en 2006 décrit la reprogrammation in vitro de cellules adultes de souris (2). Ce résultat découle des travaux de biologie fondamentale menés sur les cellules souches embryonnaires de rongeurs et d'humains, pour comprendre ce qui leur confère leur pluripotence. L'idée est d'insérer dans des cellules adultes des gènes supposés nécessaires à l'induction et au maintien de la pluripotence. Avec Kazutoshi Takahashi, Shinya Yamanaka teste 24 gènes candidats, seuls ou en les combinant les uns avec les autres. Les deux biologistes trouvent une combinaison qui fonctionne: quatre gènes nommés Oct3/4, Sox2, c-Myc et Klf4. Certes, le protocole est imparfait, car les cellules reprogrammées échouent à participer au développement de tous les tissus d'un embryon. Mais, en juin 2007, l'équipe japonaise pallie cette insuffisance (3). Ce succès chez la souris est suivi, cinq mois plus tard, de l'annonce de l'obtention de cellules iPS humaines, dont le destin est indissociablement lié à celui des cellules souches embryonnaires. Les travaux de Shinya Yamanaka ont été récompensés par le prix Nobel de médecine en 2012. ■

(1) K. Takahashi *et al.*, *Cell*, 131, 861, 2007.

(2) K. Takahashi et S. Yamanaka, *Cell*, 126, 663, 2006.

(3) K. Okita *et al.*, *Nature*, 448, 313, 2007.

ENTRETIEN AVEC **DONALD JOHANSON**

LUCY CHANGE LE COURS DE L'HISTOIRE

La découverte, par l'équipe de Donald Johanson, d'une femelle australopithèque en Éthiopie bouleverse notre vision des origines de l'homme. Celle qu'on a baptisée Lucy fait reculer les débuts de la bipédie à plus de 3 millions d'années.

Propos recueillis par **Paul Bahn**

La Recherche Pourquoi étiez-vous à Hadar, en Éthiopie, en 1974 ?

Donald Johanson En 1970, j'avais 27 ans et je préparais un doctorat de paléanthropologie à l'université de Chicago, sous la direction de E Clark Howell. Dans ce cadre, j'ai participé à l'expédition de recherche de l'Omo, en Éthiopie. Lors d'une fête, à Paris, j'ai rencontré Maurice Taieb, aujourd'hui directeur de recherche au CNRS, à Aix-en-Provence. À cette époque, il explorait la géologie d'une partie de l'Éthiopie connue sous le nom de « triangle de l'Afar ». Il m'a montré des photographies des sédiments et des fossiles qu'il avait trouvés. Si l'on en croyait les ossements de porcs et d'éléphants, tout cela avait au moins 3 millions d'années. Il m'a dit : « Si tu penses que les fossiles de l'Omo sont fantastiques, tu devrais venir dans l'Afar. » C'était assez généreux de sa part de partager les sites qu'il y avait découverts ! On ne parle pas souvent de lui à propos de Lucy, mais il a vraiment eu un rôle déterminant. Alors, au printemps 1972, nous y sommes allés en repérage pendant six semaines et nous avons trouvé beaucoup de sites fossilifères. Celui que nous avons choisi, Hadar, était quasiment le dernier que nous avions découvert.

Ce site, qu'avait-il de particulier ?

Il était extrêmement étendu, et les niveaux géologiques qui nous intéressaient étaient jonchés de fossiles. Nous avons alors organisé l'expédition internationale de recherche de l'Afar, dirigée par Maurice Taieb. En 1973, nous avons fait notre

première découverte : le genou d'un hominidé qui, à l'évidence, marchait debout. Cela nous a encouragés à y retourner, en novembre 1974.

Dans quelles circonstances avez-vous découvert Lucy ?

Maurice Taieb avait quitté le camp pour chercher du ravitaillement. Tom Gray, un étudiant en thèse, a insisté pour que j'aille voir l'emplacement où un crâne complet de porc avait été trouvé. Nous sommes donc partis au milieu de la matinée et nous avons inspecté la zone pendant environ une heure, trouvant quelques ossements d'animaux. Alors que nous retournions à la Land Rover, j'ai regardé par-dessus mon épaule et j'ai vu, sur le sol, un morceau de coude, dont j'ai immédiatement pensé qu'il appartenait à un hominidé. Nous avons alors compris qu'il y avait des ossements tout autour de nous : mâchoire, bassin, fémur. Un squelette était répandu sur environ 14 m² de ce talus.

Quelle a été votre réaction ?

Nous étions bouleversés, parce qu'il s'agissait d'un squelette assez complet, ce qui était une première, et parce que nous savions qu'il avait plus de 3 millions d'années. Je ne crois pas que j'aie réalisé à ce moment-là l'impact de cette découverte sur ma vie et sur ma carrière, et encore moins celui qu'elle aurait dans le grand public. Sur le moment, j'étais excité : je pensais que ce serait quelque chose d'extraordinairement important. Mais je ne savais pas ce que c'était. Je supposais que c'était





DONALD JOHANSON

1943 Il naît à Chicago.

1974 Ayant obtenu son doctorat de paléanthropologie, il devient conservateur au Muséum d'histoire naturelle de Cleveland et participe à une

expédition internationale de recherche dans l'Afar, en Éthiopie, dirigée par Maurice Taieb, où il découvre le squelette de Lucy, une femme australopithèque de 3 millions d'années.

1981 Il fonde l'Institute of Human Origins, à Berkeley, en Californie. Il le dirige toujours aujourd'hui, à Tempe, en Arizona. **DEPUIS 1997** Il enseigne l'anthropologie à l'université d'État de l'Arizona.

une sorte d'Australopithèque, mais il ne m'est pas venu à l'esprit que ce pourrait être une nouvelle espèce.

Avez-vous pris des photographies des ossements en place ce jour-là ?

Je n'avais pas d'appareil avec moi. Quelques personnes en ont pris le lendemain mais, dans l'ensemble, les gens étaient trop excités par ce qui se passait. Peu de temps après, Maurice Taieb est revenu au camp. Il a dit que nous devions contacter Yves Coppens et les autres participants à l'expédition qui n'étaient pas en Éthiopie à ce moment-là. Yves Coppens est finalement arrivé avec une équipe française de télévision, mais nous avions déjà fini de dégager les ossements.

D'où vient le nom de Lucy ?

Le premier soir, il y avait une ambiance spéciale. Nous avons mis de la musique, en buvant de la bière. C'est vrai, comme cela a été beaucoup raconté, que nous avons en particulier écouté *Lucy in the Sky with Diamonds*, des Beatles. Mais nous ne l'avons pas du tout passée en boucle !

Pam Alderman, ma petite amie de l'époque, qui était là, a lancé, un peu au hasard : « *Si vous pensez vraiment que c'est une femelle, pourquoi ne pas l'appeler Lucy ?* » Les jours suivants, les étudiants se sont mis à dire : « *Tu retournes sur le site de Lucy ? Est-ce que tu vas trouver d'autres morceaux du crâne de Lucy ?* » C'est comme cela qu'elle a commencé à avoir sa personnalité propre, son identité propre, et qu'elle est devenue une référence dans l'évolution humaine. Aujourd'hui, tout le monde en a entendu parler, même les enfants de l'école primaire. Je ne sais pas pourquoi, mais il semble que les gens aiment bien ce nom.

Ensuite, vous avez emporté les os pour les étudier ?

Il n'y avait pas de laboratoire au Muséum national d'Éthiopie à Addis-Abeba, et les lois de l'époque nous permettaient d'emporter les fossiles à l'étranger. L'accord entre les équipes qui participaient à l'expédition stipulait que ceux, Français ou Américains, qui feraient ●●●

PAUL BAHN est un archéologue, écrivain et traducteur britannique, spécialiste de l'art préhistorique.

(*) **Le fossile type** est le spécimen utilisé pour faire la description des caractéristiques d'une espèce, sa taxinomie.

▼ Environ 40 % du squelette de Lucy a été retrouvé, dont des éléments du crâne, une partie du bassin et du fémur, ce qui a permis de déterminer qu'elle mesurait environ un mètre et pesait 50 kg.

... une découverte la rapporteraient dans leur laboratoire et seraient les premiers à étudier les fossiles, mais que tout le monde signerait l'article (1). Nous avons donc rapporté Lucy, et d'autres fossiles, aux États-Unis, au Muséum d'histoire naturelle de Cleveland, où j'étais conservateur, et ils y ont été conservés dans un coffre fermé pendant cinq ans. Nous les avons étudiés et décrits, et nous avons finalement publié une monographie en 1982 (2).

Pouvez-vous nous dresser un bref portrait de Lucy ?

Nous avons retrouvé environ 40 % de son squelette. D'après la longueur de son fémur, 28 cm, elle devait mesurer un peu plus d'un mètre de haut. Ses dents de sagesse étaient sorties, ce

qui indique qu'elle était adulte, mais la puberté était sans doute plus précoce que chez les hommes actuels, et elle n'avait peut-être que 14 ou 15 ans quand elle est morte. Elle était minuscule : en fait, c'est l'un des plus petits fossiles d'*Australopithecus afarensis* jamais découverts. Elle ne pesait que 50 kg. C'est à cause de cette petite taille, et de la constitution légère de ses os, que nous pouvons dire que c'était une femelle. La forme du bassin n'est pas caractéristique : cette espèce avait un petit cerveau, de 380 à 550 cm³, et il n'y avait pas eu de problème lors de l'accouchement. Elle avait des bras relativement longs, probablement un vestige de l'époque où ses ancêtres vivaient dans les arbres, et elle possédait une face projetée en avant comme celle d'un singe. Elle ressemblait beaucoup à un singe en fait.

Est-elle le fossile type (*)

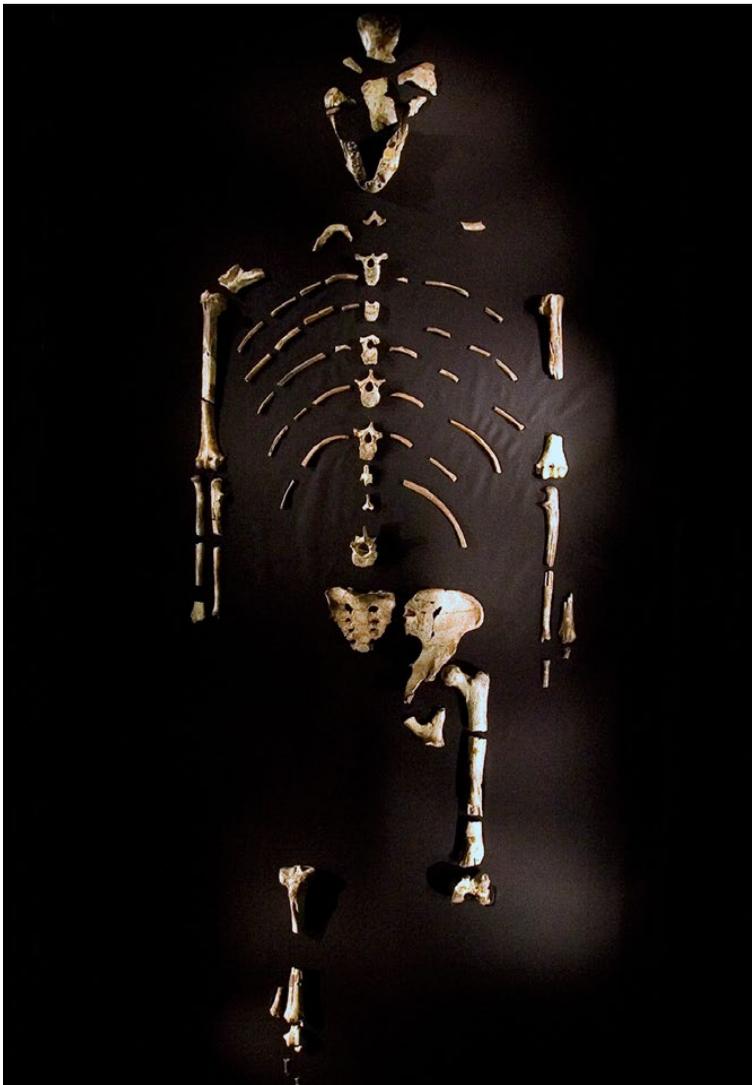
d'*Australopithecus afarensis* ?

Non. Le spécimen type est une mandibule trouvée à Laetoli, un autre site éthiopien, qui a été choisie en 1978 parce qu'elle avait déjà été complètement décrite et publiée. Rétrospectivement, je pense que j'aurais dû insister un peu plus pour que ce soit Lucy, parce qu'elle est si complète.

En 1974, la découverte de Lucy

a été importante. Ce squelette l'est-il toujours autant trente ans plus tard ?

C'était le premier squelette aussi ancien dont on pouvait examiner les proportions des membres supérieurs et inférieurs. Ses membres inférieurs étaient courts, tandis que ses membres supérieurs étaient longs. C'est particulièrement caractéristique de créatures qui passent une grande partie de leur temps dans les arbres. Quand nous regardons l'évolution du squelette des hominidés, entre les formes très simiesques et les formes très humaines, nous voyons une mosaïque de caractères. Certaines zones, telles que le système locomoteur, sont parmi les premières à changer, pendant que les longs bras des ancêtres arboricoles sont encore là. Chez Lucy, la sélection naturelle avait clairement agi sur les genoux, les chevilles et les hanches. La taille du cerveau, la forme de la mâchoire et la proportion des membres ont évolué plus tard. Lucy a été à l'origine d'énormément de recherches, de réflexions et de techniques. En particulier, dans les années 1980, il y a eu une grande controverse pour savoir si elle se tenait pleinement debout,



« Lucy a été à l'origine d'énormément de recherches, de réflexions et de techniques »

si elle pouvait tendre le genou et la hanche, et marcher comme nous. Cela a donné lieu à des centaines d'articles sur la signification de ses mains courbées, des os de son pied et de la forme de son bassin. Grâce à cela, l'étude de l'anatomie fonctionnelle s'est énormément affinée. Aujourd'hui, Lucy continue d'être étudiée par des gens qui mettent au point de nouvelles techniques, par exemple l'étude de la façon dont les couches d'émail se forment au cours de la croissance dentaire, ce qui pourrait nous renseigner sur sa vitesse de maturation et de croissance; d'autres commencent à regarder sous la surface de l'os pour voir comment les cellules sont orientées, et ce que cela peut vouloir dire sur la formation de l'os. Autant de choses que nous ne savions pas faire il y a trente ans. C'est donc toujours une source d'informations nouvelles. Lucy continue aussi d'être importante parce que c'est toujours la référence à laquelle les autres découvertes sont comparées. Quand l'une d'elles est annoncée, les journaux expliquent, par exemple, qu'elle est plus ancienne de tant de millions d'années que Lucy, ou qu'elle est située à tant de milliers de kilomètres de Lucy...

Votre point de vue sur *Australopithecus afarensis* a-t-il changé pendant toutes ces années ?

Principalement à propos de son comportement locomoteur et grimpeur. Dans les années 1970, j'étais assez convaincu que l'espèce était totalement terrestre et pleinement bipède. Je continue à croire que Lucy était complètement bipède lorsqu'elle était sur le sol, qu'elle marchait très efficacement et qu'elle était capable d'étendre le genou et la hanche, qu'elle ne marchait pas les genoux pliés. Mais je pense aussi qu'elle devait dormir dans un nid dans les arbres, à l'abri des prédateurs, ce qui nécessite une adaptation au grimper. Elle devait aussi passer une bonne partie de son temps dans les arbres à chercher de la nourriture: des fruits, des noix et des baies. Nous savons aujourd'hui qu'à son époque, Hadar était un environnement forestier.

Et depuis ● ● ●

2006

Le squelette d'un enfant est découvert sur le site éthiopien de Dikika. Baptisé Selam, il vivait il y a 3,3 millions d'années et appartenait à l'espèce *Australopithecus afarensis*.

2019

Un crâne datant de 3,8 millions d'années, très bien conservé, est découvert sur le site de Hadar, en Éthiopie. L'analyse de sa dentition permet d'attribuer le crâne à *Australopithecus anamensis*, l'ancêtre direct de Lucy.

Un article récent avance qu'*Australopithecus afarensis* pouvait s'adapter à toutes sortes d'environnements, sans préférence particulière (3).

Êtes-vous d'accord ?

Absolument. Assez tôt, après que le nom d'*Australopithecus afarensis* a été donné à Lucy, il était déjà clair, d'après les études paléoenvironnementales, que Laetoli était une savane ouverte, tandis que Hadar, à environ 1 000 kilomètres, était plus boisé. C'était donc une espèce géographiquement dispersée et très adaptable. Elle pouvait survivre dans des environnements très divers.

Pourquoi continuez-vous à aller à Hadar ?

Quand les journalistes me demandent: « *Qu'espérez-vous trouver quand vous y retournerez ?* », ma réponse est toujours: « *L'inattendu.* » Nous avons exploré systématiquement la région depuis une bonne dizaine d'années. C'est de cette façon que nous avons trouvé, au milieu des années 1990, le plus ancien *Homo* associé à des outils de pierre. C'est aussi comme cela que nous avons trouvé un nouveau crâne de femelle il y a deux ans: c'est le crâne le plus complet d'*Australopithecus afarensis*, daté de 3,1 millions d'années. Et nos nombreux spécimens de Hadar, des mâchoires, des dents, des crânes, des membres, etc., mis au jour sur environ 80 km², forment la collection la plus complète d'une seule espèce sur près d'un demi-million d'années. Ce sera la collection de référence qui servira à juger les autres.

Quel est l'avenir de Hadar ?

Maintenant que nous avons plus ou moins épuisé le site, il entre dans une phase de conservation: il va devenir une destination touristique, pour ceux qui voudront voir l'endroit où Lucy a été trouvée. Le ministre éthiopien de la Culture a posé en janvier 2004 la première pierre du Musée d'interprétation de Lucy, dans le village d'Elowaha (« le puits »), qui est situé à 90 minutes de voiture du site de la découverte. Nous espérons que les premiers paléotouristes viendront d'ici dix-huit mois. Nous essayons de rendre quelque chose à l'Éthiopie, qui a accueilli et soutenu la venue des équipes de recherche, et aussi au peuple de l'Afar qui a travaillé avec nous toutes ces années. ■

(1) D. C. Johanson *et al.*, *Kirtlandia*, 28, 1, 1978.

(2) *American Journal of Physical Anthropology*, 57 (4), 1982.

(3) R. Bonnefille *et al.*, *PNAS*, 101, 12125, 2004.



LES CHEFS-D'ŒUVRE RÉVÉLÉS DE LA GROTTTE CHAUVET

La découverte de la grotte Chauvet, en Ardèche, en 1994, met au jour les plus beaux exemples d'art pariétal jamais révélés. Dans un état de conservation admirable, ce spectaculaire panneau des Chevaux dévoile 21 figures animales (la grotte en compte 420 au total) sur une surface de 4 m² environ. Ces œuvres ont été réalisées par des artistes aurignaciens il y a au moins 30 000 ans.

TOUMAÏ QUESTIONNE LES ORIGINES DE L'HOMME

La découverte d'un crâne fossile de 6 à 7 millions d'années ressemblant à celui d'un Australopithèque a révélé la grande diversité des premiers hominidés.

Bernard Wood, anthropologue

Il peut suffire d'un fossile pour modifier fondamentalement la manière dont nous reconstituons l'arbre de la vie. Il y a soixante-quinze ans, la description par Raymond Dart du crâne de Taung, en Afrique du Sud, avait été à l'origine d'un tel bouleversement. Dart confirmait par des preuves la prédiction de Charles Darwin, pour qui les racines les plus lointaines de l'histoire humaine devaient se trouver en Afrique (1). Le crâne fossile découvert par Michel Brunet et son équipe, baptisé Toumaï, marque un tournant similaire dans notre perception des origines de l'homme (2). Complété par un fragment de mâchoire et plusieurs dents, ce crâne appartient à un hominidé (précurseur primitif des humains), auquel il a été attribué l'âge étonnant de 6 à 7 millions d'années. Les implications de cette découverte sont plus subtiles que pour celle de Dart, mais aussi fondamentales : nous avons ici la preuve manifeste que nos origines sont aussi complexes et difficiles à reconstituer que celles de tout autre groupe d'organismes vivants.

Il y a près de cent cinquante ans que les hommes modernes sont considérés comme de plus proches parents du chimpanzé et du gorille que de l'orang-outan (3). Aujourd'hui, les arguments fournis par les os et les dents, mais aussi par les tissus mous (muscles, nerfs, etc.) et par les analyses d'ADN, confirment que l'homme moderne et le chimpanzé sont particulièrement proches (4). Étalonnées en fonction des données paléontologiques, les différences entre les ADN des deux espèces indiquent que le probable



▲ La structure de la face, les canines de petite taille ainsi que la base du crâne de Toumaï sont caractéristiques de l'hominidé.

ancêtre commun à l'homme moderne et au chimpanzé a vécu il y a quelque 5 à 7 millions d'années.

Or aucun fossile trouvé hors d'Afrique n'est plus ancien que 2 millions d'années. Si « l'horloge moléculaire » (*) est d'une précision raisonnable, on est donc amené à conclure que le continent africain a bien été le théâtre où l'homme a évolué, pour une période de 3 à 5 millions d'années. Quatre « fenêtres » régionales nous offrent, par les fossiles qu'on y trouve, un regard sur les débuts de notre évolution. La fenêtre d'Afrique du Sud a été ouverte par Dart en 1925 avec la découverte, à Taung, près de Kimberley, du premier fossile d'hominidé de cette région; depuis cette date, les grottes avoisinantes ont fourni une riche moisson de fossiles, vieux pour certains de 3 à 3,5 millions d'années.



(*) L'horloge moléculaire indique le taux d'évolution moléculaire d'un organisme à partir de l'étude des mutations dans son matériel génétique.

POTENTIEL EN AFRIQUE CENTRALE

La fenêtre de l'Est africain regroupe des sites répartis le long de la vallée du Rift oriental, qui atteint presque le golfe d'Aden au nord et s'étend dans sa partie méridionale jusqu'au nord de la Tanzanie. Ces sites sont associés à des bassins sédimentaires ou aux rivières qui les alimentaient ou les drainaient. Jusqu'à présent, les traces des plus anciennes créatures considérées comme des ancêtres plausibles de l'homme avaient été découvertes dans deux de ces lieux : Middle Awash, en Éthiopie, et Lukeino, au Kenya.

Quant aux deux dernières régions, le Malawi et le Tchad, elles ressemblaient plus à un trou de serrure qu'à une véritable fenêtre avec une ●●●

●●● vue imprenable sur le passé! On a trouvé au Malawi les traces d'une espèce d'hominidé à grandes dents, probablement *Paranthropus aethiopicus*. Quant au Tchad, le premier « hominidé ancien » y a été découvert en 1961 et baptisé *Tchadanthropus uxoris*. Mais le fossile en question s'est révélé n'être qu'un crâne humain moderne tellement érodé par le vent de sable qu'il avait pris l'aspect d'un crâne d'Australopithèque, un hominidé primitif. Le second, *Australopithecus bahrelghazali*, découvert en 1995 sur le site de Koro Toro, est en revanche un authentique Australopithèque (5). C'est lui qui a attiré l'attention des paléontologues sur le potentiel de la partie occidentale de l'Afrique centrale.

RICHE MOISSON DE FOSSILES ANIMAUX

Quatre zones situées dans le bassin du Tchad et aux alentours ont « produit » des fossiles de mammifères. Ceux que viennent de décrire Michel Brunet et son équipe proviennent d'un seul site, TM 266, dans la plus ancienne de ces zones: Toros-Menalla, dans le désert du Djourab. La découverte de Toumaï et des autres fossiles vient récompenser la ténacité de Michel Brunet, de Patrick Vignaud, et de leurs équipes. Le vent de sable souffle là-bas en permanence et les couches fossiles sont difficiles à déceler. Elles ont au maximum quelques mètres d'épaisseur et n'ont pas grand-chose à voir avec les amas sédimentaires dont nous sommes coutumiers (gorges d'Olduvaï en Tanzanie et autres sites analogues). Pourtant, les fossiles de vertébrés sont bien conservés et le fameux crâne d'hominidé, désigné sous le nom de code de TM 266-01-060-1, est remarquablement complet.

Les techniques de datation absolue isotopique sont inapplicables aux fossiles de Toros-Menalla, car le site est dépourvu des couches de cendres dans lesquelles on trouve l'argon ou le potassium qui servent de base à l'analyse. Les sédiments ne permettent pas non plus la datation par étude du magnétisme. Les chercheurs ont donc comparé la riche moisson de fossiles du site TM 266, qui compte des spécimens de 44 groupes d'animaux, à des gisements fossiles analogues trouvés en Afrique orientale et pour lesquels on dispose de datations absolues. L'accord est particulièrement bon avec deux sites du Kenya: Lukeino, dans les collines de Tugen, daté d'environ 6 millions d'années, et Nawata, à

BERNARD WOOD est professeur d'anthropologie à l'université américaine George Washington, à Washington.

Lothagam (5,3 à 7,4 millions d'années). On peut ainsi, de manière fiable, attribuer aux fossiles de Toros-Menalla un âge de 6 à 7 millions d'années. Les chercheurs ont comparé leur découverte à ce qui a été publié au sujet de deux autres candidats au titre de « plus vieil hominidé »: *Ardipithecus ramidus*, de Middle Awash, en Éthiopie, et *Orrorin tugenensis*, de Lukeino, au Kenya. Ils se sont convaincus et ont convaincu d'autres, dont moi-même, que les dents du nouveau fossile fondent une différence taxinomique et ils l'ont donc rattaché à une espèce et à un genre nouveaux: *Sahelanthropus tchadensis*.

Quel rôle celui-ci a-t-il joué dans l'apparition des chimpanzés et des hommes? Les deux espèces sont aujourd'hui très différentes d'aspect, mais les différences entre les premiers ancêtres des chimpanzés et des hommes modernes étaient sans doute beaucoup moins marquées.

On considère en général que l'ancêtre commun à l'homme et au chimpanzé, et les premiers membres de la lignée de ce dernier, étaient adaptés à la vie arboricole, avec un tronc horizontal ou vertical et des membres antérieurs permettant la marche en appui sur les phalanges, au sol ou sur les grosses branches. Ces traits s'accompagnaient probablement d'un massif facial projeté vers l'avant et de mâchoires allongées aux molaires relativement petites, et, chez les mâles, aux canines supérieures volumineuses s'usant par frottement contre les prémolaires inférieures. À l'origine de notre propre lignée, en revanche, les premiers hominidés devaient se distinguer

▼ Les nombreux fossiles animaux retrouvés sur le site de Toros-Menalla ont été comparés à ceux d'autres sites d'Afrique orientale pour permettre de dater Toumaï de manière fiable.



Toumaï n'est peut-être que la partie émergée de l'iceberg de la diversité qui a marqué l'évolution

par quelques adaptations, notamment squelettiques, à la posture verticale et à la marche ou à la course en position bipède. Ils devaient aussi se démarquer par un appareil masticateur doté de molaires plus volumineuses et, chez le mâle, de canines de taille plus modeste ne s'usant que par la pointe. Autre élément distinctif : des signes d'augmentation du volume cérébral. À l'aune de ces critères, ce sont la face, la mâchoire et les canines de *Sahelanthropus tchadensis* qui le désignent comme un hominidé situé à l'origine de la lignée de l'homme moderne, ou au moins à proximité.

TROUBLANTES CARACTÉRISTIQUES

Les origines de l'homme et les premières phases de l'évolution des hominidés font l'objet de deux théories. Selon le modèle linéaire (ou « ordonné »), l'anatomie caractéristique des hominidés ne serait apparue qu'une seule fois et aurait donné lieu à l'enchaînement en ligne droite d'une série unique de descendants. Ce modèle ne laisse pas de place à la moindre bifurcation jusqu'il y a moins de 3 millions d'années.

Selon le modèle « en buisson » ou « désordonné », cette évolution se présenterait au contraire comme une série de diversifications évolutives, où les caractéristiques anatomiques se mêlent et s'associent d'une manière que nous commençons à peine à comprendre. Ce modèle, auquel je souscris, admet l'acquisition indépendante de caractères similaires et considère que des adaptations clés des hominidés, comme la bipédie, la dextérité manuelle et le gros cerveau, ont pu apparaître plus d'une fois. Ainsi, la possession par une espèce d'un ou de plusieurs des caractères supposés distinctifs des hominidés ne suffit pas à en faire l'ancêtre direct de l'homme moderne. Comment ce modèle pourrait-il s'appliquer à Toumaï? Le crâne découvert est de la taille de celui d'un chimpanzé et il est remarquable par ses caractéristiques « en mosaïque ». Vu de l'arrière, il évoque celui d'un chimpanzé alors que, de face, il pourrait passer pour celui d'un Australopithèque évolué de 1,75 million d'années. Les caractéristiques qui en font un hominidé sont la structure de la face et les canines de petite taille, la base du crâne et le fragment de mâchoire.

Si l'on considère ces éléments comme suffisants pour faire de *Sahelanthropus tchadensis* un hominidé situé à la racine de la lignée qui conduit

à l'homme moderne, on remet sérieusement en question le modèle linéaire. Selon celui-ci, en effet, un hominidé aussi âgé devrait commencer à peine à présenter certains signes caractéristiques de la lignée. Qui plus est, si l'on place ce fossile à l'origine de la lignée, le modèle linéaire commanderait d'exclure des ancêtres de l'homme moderne toutes les créatures ayant une face plus primitive et la liste en est longue...

À l'inverse, le modèle du buisson n'interdit pas de trouver, à 6 ou 7 millions d'années, les traces de créatures associant les traits des hominidés et ceux des chimpanzés, voire possédant des caractéristiques nouvelles. De plus, comme il admet l'acquisition indépendante de caractères similaires, ce modèle amène à penser que certaines structures, comme le bourrelet sus-orbitaire dont *Sahelanthropus tchadensis* est manifestement pourvu, sont probablement peu fiables pour reconstruire les liens entre fossiles. Des créatures diverses peuvent partager des traits sans les avoir forcément hérités d'un ancêtre commun.

Sahelanthropus tchadensis est un candidat au rôle de premier hominidé, mais je pense que ce sera impossible à démontrer. À mon avis, il n'est que la partie émergée de l'iceberg de la diversité taxinomique, qui a marqué l'évolution des hominidés il y a de cela 5 à 7 millions d'années. Il a sûrement un lien important et étroit avec le rameau des hominidés. Mais je pense plutôt qu'il constituera une preuve révélatrice de la diversification évolutive des créatures fossiles de la famille des grands singes, à laquelle appartenait l'ancêtre commun de l'homme moderne et du chimpanzé. La faune des schistes de Burgess, au Canada, où l'on trouve un stupéfiant assortiment de groupes d'invertébrés datant de quelque 500 millions d'années, est un exemple célèbre de diversité à la base d'une diversification évolutive. *Sahelanthropus tchadensis* appartient-il à l'équivalent des schistes de Burgess pour les singes africains? ■

(1) R. A. Dart, *Nature*, 115, 195, 1925.

(2) M. Brunet et al., *Nature*, 418, 145, 2002.

(3) T. H. Huxley, *Evidence as to Man's Place in Nature*, Williams & Norgate, 1863.

(4) R. Boyd et al., *Probing Human Origins*, Am. Acad. Arts Sci., 2002.

(5) M. Brunet et al., *Nature*, 378, 273, 1995.

Et depuis ●●●

● 2005

À partir d'images numériques en coupe obtenues par scanner et d'un logiciel de réalité virtuelle, une équipe de l'université de Zurich reconstitue le crâne de Toumaï en 3D. La question de sa bipédie reste ouverte.

● 2008

Le squelette d'*Ardipithecus ramidus*, datant de 4,4 millions d'années, est décrit en détail sans lever pour autant les controverses sur sa bipédie.

ON A TOUS UN PEU DE NEANDERTAL

Le séquençage du génome de Neandertal révèle des échanges avec l'homme moderne pendant la préhistoire. Une avancée qui ouvre la voie à une nouvelle discipline : la paléogénomique.

Nicolas Constans, journaliste

Qui était l'homme de Neandertal ? Un voisin ? Un parent éloigné ? Non, un ancêtre. En menant à bien une entreprise colossale de séquençage d'ADN fos-

sile, l'équipe de Svante Pääbo, de l'Institut Max-Planck de Leipzig, en Allemagne, a répondu à une question que nombre de préhistoriens pensaient ne pas voir résolue de sitôt. Leurs résultats, publiés le 7 mai 2010, ont en effet montré que les Européens et les Asiatiques actuels ont reçu quelques pour cent de leurs gènes de lointains ancêtres néandertaliens (1). Il y a donc eu des unions fertiles entre hommes modernes et néandertaliens pendant la préhistoire.

« C'est quand même assez phénoménal d'avoir réussi à séquencer l'ADN nucléaire », s'enthousiasme Pascal Depaepe, directeur scientifique et technique de l'Institut national de recherches archéologiques préventives. Jusqu'ici, seul l'ADN contenu dans les mitochondries, de petits organites qui produisent l'énergie des cellules, avait été séquencé complètement. Il s'agit d'une courte séquence génétique d'environ 16 000 paires de nucléotides (2) seulement, et elle n'est transmise qu'en lignée féminine. Elle renferme beaucoup moins d'informations que les 3 milliards de paires de nucléotides de l'ADN nucléaire, celui des chromosomes contenus dans le noyau de la cellule et transmis par les deux parents.

La tâche était particulièrement ardue. Car, dans les fossiles, cet ADN est fragmenté en plusieurs millions de petits morceaux qu'il faut remettre

bout à bout, et dans le bon ordre. En outre, ces fragments d'ADN sont mêlés à ceux de microbes, en très grande quantité, qui vivaient en symbiose avec l'organisme ou qui l'ont colonisé après sa mort. Enfin, l'ADN peut être contaminé par celui des archéologues qui ont réalisé les fouilles, et celui des techniciens qui ont fabriqué les produits et les instruments utilisés pour manipuler les échantillons.

SÉQUENÇAGE DE TROIS INDIVIDUS

La plupart des spécialistes se déclarent donc impressionnés par ce résultat. Mais leurs avis divergent quant à l'interprétation à en donner. Certains mettent en garde contre la tentation de vouloir tout expliquer par la génétique, au détriment de l'archéologie. « Les migrations et les disparitions de populations ont souvent des causes culturelles, indique Pascal Depaepe. Par exemple, quand le Groenland s'est refroidi au XIV^e siècle, les Vikings ont peu à peu disparu de la région, notamment parce qu'ils ne parvenaient plus à trouver du foin pour leur bétail. Les Inuits, qui avaient pourtant globalement les mêmes gènes d'hommes modernes, ont en revanche su adapter leur mode de vie pour y rester. Pour la préhistoire, c'est la même chose : il faut vraiment que paléogénéticiens, paléoanthropologues et archéologues travaillent ensemble pour croiser leurs analyses. »

Tous soulignent les incertitudes qui pèsent encore sur ces résultats. D'une part, la séquence d'ADN qui a été publiée n'est pas issue d'un seul individu. Il s'agit du regroupement des séquences partielles de trois Néandertaliennes



(*) Les nucléotides sont les briques élémentaires qui s'apparient et dont l'assemblage forme la séquence de la double hélice d'ADN.

ayant vécu il y a à peu près 40 000 ans, et dont les ossements avaient été découverts dans la grotte de Vindija, en Croatie. D'autre part, les scientifiques n'ont pas encore pu répéter le séquençage suffisamment de fois pour que le résultat soit exempt d'erreurs. « *En fait, 15 à 30 % seulement de l'ADN obtenu sont vraiment fiables* », explique Eva-Maria Geigl, de l'Institut Jacques-Monod, à Paris.

Ces incertitudes rendent prudent Patrick Semal, de l'Institut royal des sciences naturelles, à Bruxelles. « *La paléogénétique est encore jeune, rappelle-t-il. Depuis les premiers travaux sur l'ADN de Neandertal en 1997, des annonces ont été faites puis contredites, et les méthodes de séquençage ont beaucoup changé. C'est pourquoi je préfère attendre des confirmations.* »

D'autres préhistoriens voient dans ce séquençage le début d'une ère nouvelle, la paléogénomique. « *Il y a dix ans, explique Bruno Maureille, du CNRS et de l'université de Bordeaux, séquençer l'ADN nucléaire d'un Néandertalien paraissait impensable. À mesure que*

les techniques de séquençage se banaliseront, il va être envisageable de séquencer beaucoup d'autres génomes préhistoriques, comme ceux d'autres Néandertaliens ou d'hommes modernes. À terme, nous devrions pouvoir évaluer la diversité au sein de ces populations, y identifier d'éventuels sous-groupes géographiques, et établir leurs liens de parenté. »

In fine, la paléogénomique pourrait constituer une manière de tester les grandes théories des migrations de la préhistoire, jusqu'ici fondées sur l'étude des fossiles humains et des types d'objets que les hommes fabriquaient. D'où vient Neandertal et quels sont ses ancêtres ? Quels groupes humains ont quitté l'Afrique pour coloniser l'Europe entre 40 000 et 30 000 ans ? D'où venaient ceux qui sont parvenus jusqu'en Australie il y a plus de 40 000 ans ? Autant de questions aujourd'hui sans réponses.

Mais l'ADN ancien n'est pas la seule source d'information sur les populations préhistoriques et leurs éventuels mélanges. Certaines de ces migrations – et ces mélanges de ●●

▼ Afin de séquencer le génome de Neandertal, de l'ADN fossile a été extrait des ossements de trois spécimens retrouvés dans la grotte de Vindija, en Croatie.





◀ En 2010, le biologiste Svante Pääbo et son équipe ont révélé les liens entre Neandertal (crâne sur la photo) et Homo sapiens grâce au séquençage de l'ADN du premier.

●●● populations – ont probablement laissé des traces dans le génome des hommes actuels. Elles sont plus difficiles à déceler en raison des nombreux événements tels que des guerres ou des déplacements de populations, qui se sont déroulés entre-temps et ont pu eux aussi marquer notre génome de leur empreinte. Pour les retrouver, il est nécessaire de connaître l'étendue de la diversité génétique des hommes actuels. Pour l'instant, les généticiens disposent des ADN nucléaires de quelques centaines d'individus seulement, originaires de grands pays industrialisés pour la plupart. Un biais géographique qui sous-estime fortement la diversité dans la population mondiale, comme l'a montré une étude publiée en février dernier. En séquençant pour la première fois l'ADN nucléaire de Bushmen d'Afrique australe, une équipe internationale a en effet montré que la diversité génétique y est très grande : il y a plus de différences entre l'ADN de deux Bushmen qu'entre celui d'un Européen et celui d'un Asiatique (2). La connaissance de cette diversité devrait toutefois rapidement progresser. « Le séquençage de l'ADN nucléaire devient de moins en moins coûteux, indique Eva-Maria Geigl. Il va être possible dans les prochaines années de séquencer des milliers, voire des centaines de milliers, d'individus. » Un recensement réalisé à l'automne 2010 par la revue *Nature* auprès des principaux centres de génomique du monde entier donne une estimation de plus de 30 000 génomes humains complets d'ici la fin 2011 (3).

Ces études révéleront peut-être que les Néandertaliens ne sont pas le seul groupe à avoir apporté un petit peu de ses gènes aux hommes actuels. Car ils n'étaient peut-être pas, avec les hommes modernes, les seuls habitants de l'Europe lors de la préhistoire. En mars 2010, l'équipe de Leipzig a en effet publié le séquençage de l'ADN mitochondrial d'une phalange humaine d'environ 40 000 ans, trouvée dans la grotte de Denisova, dans l'Altaï, en Russie (4). Le résultat a, là encore, créé la surprise : cette séquence ne ressemblait ni à celles des Néandertaliens ni à celles des hommes modernes. Elle avait en moyenne 380 différences avec les séquences mitochondriales d'hommes actuels, quand on en compte seulement 200 pour les Néandertaliens.

Et depuis ●●●

● 2014

Pour la première fois, des traces d'art rupestre néandertalien datant de plus de 39 000 ans sont mises au jour au fond d'une grotte à Gibraltar par une équipe de l'université de Huelva, en Espagne.

● 2016

La datation à 176 500 ans d'une structure circulaire réalisée en stalagmites, dans la grotte de Bruniquel, dans le Tarn-et-Garonne, conduit à l'attribuer à Neandertal, seul à vivre en Europe à cette époque.

● 2018

Des peintures rupestres de trois sites espagnols sont attribuées à Neandertal car datées à plus de 64 000 ans, soit 20 000 ans avant l'arrivée d'Homo sapiens.

RÉVÉLER DE NOUVELLES ESPÈCES

Bref, il y avait une possibilité que la phalange de Denisova appartienne à une espèce humaine de cette époque que nous n'aurions pas encore identifiée. S'agissait-il d'une survivance des ancêtres de Neandertal, *Homo heidelbergensis*, ou d'une espèce dont aucun fossile n'aurait encore été découvert ? Pour y voir plus clair, il fallait séquencer l'ADN nucléaire du fossile de Denisova. Quelques mois après, Svante Pääbo a annoncé lors d'une conférence aux États-Unis que ce travail était bien plus avancé que prévu. Selon des résultats préliminaires, il n'excluait pas que ce fossile appartienne à une lignée ayant un certain degré de parenté avec Neandertal. En revanche, contrairement à l'ADN de ce dernier, la séquence de Denisova ne montrerait aucune trace de métissage avec les hommes modernes (5).

« Le séquençage de l'ADN de la grotte de Denisova présente un intérêt immédiat pour la préhistoire, explique Patrick Semal. C'est la perspective de pouvoir identifier une espèce à partir de fragments osseux trop petits pour que leur forme nous permette de les identifier. C'est prometteur car les fouilles en produisent assez fréquemment. » La paléogénomique pourrait ainsi révéler de nouvelles espèces, la présence de certaines dans des régions où on ne les attendait pas, ou encore des liens de parenté insoupçonnés. ■

- (1) R. E. Green *et al.*, *Science*, 328, 710, 2010.
- (2) S. C. Schuster *et al.*, *Nature*, 463, 943, 2010.
- (3) *Nature*, 467, 1026, 2010.
- (4) J. Krause *et al.*, *Nature*, 464, 894, 2010.
- (5) J. A. Capra *et al.*, *Genome Biology*, 11, 306, 2010.

HOMO SAPIENS VIEILLIT DE 100 000 ANS

Une nouvelle datation de fossiles d'*Homo sapiens* retrouvés au Maroc en 1961 leur a attribué 300 000 ans ! Un résultat spectaculaire qui repousse de 100 000 ans l'âge présumé de notre espèce.

Thibault Panis, journaliste



▲ Les fossiles ont été retrouvés dans la mine de Jebel Irhoud, au Maroc, qui abritait vraisemblablement une grotte à l'époque des *Homo sapiens*.

Tout est parti d'une idée fixe : dater de nouveau les fossiles d'*Homo sapiens* découverts en 1961 dans la mine de Jebel Irhoud, au Maroc. Leur estimation antérieure leur don-

nait 40 000 ans – pas très convaincant aux yeux d'Abdelouahed Ben-Ncer, de l'Institut national des sciences de l'archéologie et du patrimoine (Insap) au Maroc, et de Jean-Jacques Hublin, du département d'évolution humaine de l'Institut Max-Planck de Leipzig, en Allemagne. Au début des années 2000, les deux chercheurs et leur équipe entreprennent de nouvelles datations, d'abord par thermoluminescence (*) des silex du site, puis par résonance de spin électronique (**). Mais ces méthodes nécessitent un relevé précis de la radioactivité sur l'ensemble du gisement, ce qui



(*) **La datation par thermoluminescence** des silex brûlés est possible car ces derniers ont accumulé de l'énergie. En les réchauffant, on mesure cette énergie.

(**) **La datation par résonance de spin électronique** utilise la dose totale de radiation depuis la formation ou l'enfouissement des silex.

implique d'y placer une grande quantité de dosimètres. Le site, obstrué et abîmé par l'exploitation de la mine, doit être déblayé à l'engin de chantier. Par chance, les résultats sont à la hauteur des efforts consentis. La nouvelle datation des fossiles de Jebel Irhoud est spectaculaire : 300 000 ans. Ils sont donc de 100 000 ans plus âgés que les plus anciens fossiles *Homo sapiens* connus jusqu'alors. Après l'annonce de la découverte, en juin 2017, notre espèce a pris un grand coup de vieux (1).

Concrètement, que changent ces résultats ? En premier lieu, ils mettent en lumière une époque encore inconnue : celle des premiers pas de notre espèce en Afrique. Jusqu'à présent, nous ne disposions presque d'aucun vestige d'*Homo sapiens* anciens. Il y avait bien les crânes Omo 1 et Omo 2, découverts à Kibish, en Éthiopie, en 1967. En 2005, le géochimiste australien Ian McDougall les ●●●

... avait datés à 196 000 ans, ce qui faisait d'eux les plus anciens représentants de notre lignée. Suivaient les trois crânes de Herto, découverts en 1997 par l'archéologue et paléontologue américain Tim White dans la région de l'Afar, encore en Éthiopie. Leur âge était estimé à 150 000 ans. Les représentants suivants de l'espèce *Sapiens* provenaient de la grotte de Qafzeh, en Israël, et dataient de 100 000 ans. Nos certitudes concernant nos origines se résumaient donc à trois points répartis sur 100 000 ans – pas vraiment de quoi bâtir un récit.

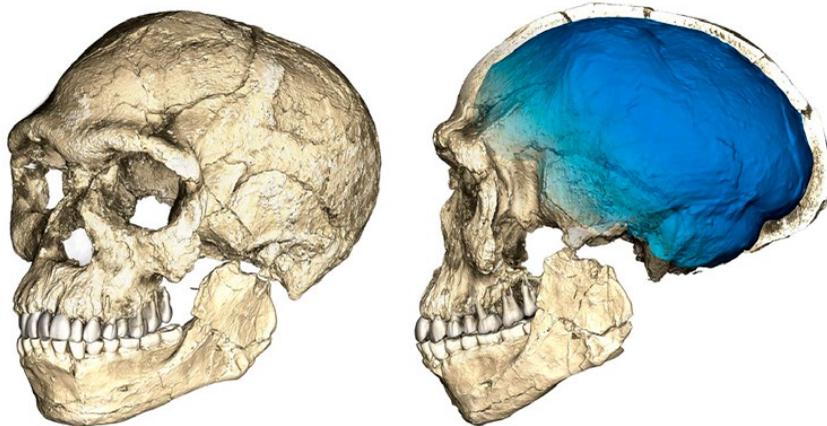
Certes, les fossiles de Jebel Irhoud ne sont qu'un point de plus sur la carte. Ils apportent néanmoins un changement de perspective salutaire. « C'est

de Jebel Irhoud : l'espèce humaine serait née en un lieu déterminé, un « jardin d'Éden », d'où elle aurait essaimé ailleurs en Afrique, puis sur tous les continents. Une croyance fondée sur le fait qu'Omo 1, Omo 2 et l'homme de Herto provenaient tous d'Éthiopie, berceau tout désigné de nos ancêtres. Ce récit est mis à mal par les fossiles de Jebel Irhoud, car ceux-ci sont bien antérieurs dans le temps et distants de près de 6 000 kilomètres. Alors le Maroc, nouvelle pouponnière de l'humanité? Tant s'en faut.

La seule certitude à laquelle il faut désormais se résoudre est qu'un lieu d'apparition unique et localisé de notre lignée n'existe pas. À la place, l'équipe de Jean-Jacques Hublin propose plutôt un scénario d'émergence « panafricaine » de l'humanité : les caractères « modernes » (conformes à ce que l'on observe chez l'humanité actuelle) seraient apparus à différents endroits et moments. Entre au moins 300 000 et 200 000 ans avant notre ère, ils étaient présents un peu partout en Afrique. Voilà qui permet de mieux comprendre, par exemple, ces curieux fossiles de Florisbad trouvés en Afrique du Sud et datés de 260 000 ans, affichant des caractères *sapiens* mais que l'on peinait jusqu'alors à intégrer dans le « scénario éthiopien » (2).

CARACTÈRES ENCORE ARCHAÏQUES

S'érode aussi l'espoir de mettre la main sur l'*Homo sapiens* qui, d'un seul coup, aurait acquis tous les caractères modernes et serait semblable à nous. Au contraire, le portrait des hommes de Jebel Irhoud ne colle pas avec cet idéal d'Adam et Ève primordiaux. Il ne correspond pas à l'image que l'on se faisait des premiers hommes anatomiquement modernes. Certes, certains de leurs caractères, comme la forme de leur face ou de leur mâchoire, sont des traits dérivés et novateurs, propres à l'humanité actuelle. En cela, ils sont claudiquement (*) modernes et nous partageons indiscutablement avec eux un ancêtre commun. Mais d'autres de leurs caractères restent archaïques. C'est le cas de leur boîte crânienne qui, quoiqu'aussi volumineuse que la nôtre (1 400 cm³), est encore plate, signe que leurs lobes pariétaux ne se sont pas développés vers le haut comme chez nous. « On avait tendance à imaginer que les espèces humaines se succédaient et apparaissaient en bloc, explique Antoine Balzeau. Or l'évolution ne fonctionne pas ainsi.



▲ Cette reconstitution de la boîte crânienne des hommes de Jebel Irhoud, réalisée à partir de scans de plusieurs fossiles, montre qu'elle était aussi volumineuse que la nôtre.

une découverte majeure, car elle contextualise beaucoup mieux nos connaissances de cette période, décrypte Antoine Balzeau, paléanthropologue au CNRS et au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Elle double l'échelle de temps des origines d'*Homo sapiens* et agrandit considérablement la zone géographique où s'est déroulée cette histoire. »

La découverte a surtout le mérite de dynamiser certaines croyances. « On croit trop souvent que si l'on trouve le fossile le plus ancien, c'est forcément le premier, le début de l'histoire, s'amuse Antoine Balzeau. Mais, en fait, on retrouve des fossiles par hasard. Croire que Omo 1 était le premier représentant de la lignée parce qu'il était le plus ancien que nous connaissions était un raccourci vraiment simpliste. » Et une hypothèse démentie par les vestiges de Jebel Irhoud. D'ailleurs, ces fossiles ne sont sûrement pas les premiers *Homo sapiens*, mais simplement, et c'est déjà beaucoup, les plus anciens qui nous soient parvenus. Autre mythe qui s'effondre avec la découverte

(*) Un **clade** est un très grand groupe d'animaux ou de plantes descendant d'ancêtres communs.



« Simplement, au sein d'un groupe existant, des caractères nouveaux apparaissent. Mais tous ne surviennent pas au même moment et les groupes évoluent progressivement. Il n'est pas illogique de penser que les premiers *Homo sapiens* n'avaient pas la même tête que ceux d'aujourd'hui, et c'est précisément ce que l'on observe chez les fossiles de Jebel Irhoud. » Jusqu'à présent, on ne rangeait dans la famille *Homo sapiens* que des fossiles qui disposaient de la majorité des traits de l'humanité actuelle. C'était le cas de l'homme de Herto. Les spécimens de Jebel Irhoud nous obligent à revoir la copie et à envisager des *Homo sapiens* anciens, à la modernité plus contrastée.

Reste la question, inévitable, de l'espèce ancestrale dont ces *Homo sapiens* archaïques proviennent. Les postulants sont nombreux dans la pléthore de lignées qu'ont engendrées les *Homo erectus* entre 800 000 et 600 000 ans avant aujourd'hui. Parmi eux, *Homo heidelbergensis* et *Homo rhodesiensis* sont de bons candidats potentiels. Mais, là encore, il faut se préparer à faire le deuil. « Nous n'arriverons probablement jamais à répondre à cette question », estime Antoine Balzeau. Car, pour identifier un lien entre une espèce ancestrale et une espèce dont elle descend, il faut qu'elles partagent des caractères communs. Or ces caractères partagés étant archaïques, ils sont également communs à d'autres lignées.

« C'est la limite de l'approche. Bien entendu, au fond de moi, j'aurais tendance à imaginer que l'ancêtre d'*Homo sapiens* est *Homo rhodesiensis*, du fait de leur proximité géographique [ses fossiles ont été retrouvés partout en Afrique, NDLR],

▲ De nombreux outils de pierre ont été retrouvés à Jebel Irhoud, ainsi que des éclats de silex brûlés qui ont permis de procéder à la datation des fossiles du site par thermoluminescence.

temporelle et évolutive. Mais jamais aucune donnée anatomique ne permettra de le démontrer », juge le spécialiste. Ce raisonnement s'applique d'ailleurs lorsque l'on s'interroge sur le lien de parenté entre l'humanité actuelle et les hommes de Jebel Irhoud. « D'accord, ils ont des traits propres à *Homo sapiens*, résume Antoine Balzeau. Mais cela ne veut pas non plus dire que ce sont nos ancêtres: il peut s'agir d'un rameau différent. »

UNE SORTIE PRÉCOCE D'AFRIQUE

Néanmoins, la paléanthropologie progresse, et Jebel Irhoud en est la preuve éclatante. À chaque découverte, la carte très partielle que nous avons de notre histoire se complète et notre vision évolue. Parallèlement, d'autres disciplines explosent tous azimuts et complètent la traditionnelle étude des fossiles. C'est le cas de la paléogénétique, dont l'efficacité n'a fait que se confirmer depuis l'identification en 2008 d'une nouvelle lignée cousine à notre espèce, les Denisoviens, à partir de l'extraction d'ADN d'un minuscule bout d'os. Les progrès et la baisse de coût du séquençage génétique permettent également d'établir des bases de données de plus en plus massives, à même de livrer de précieuses indications sur les liens de parenté entre les populations actuelles et les groupes humains ancestraux. Ainsi, en octobre 2016, des paléogénéticiens ont pu établir que l'ensemble des populations actuelles non africaines disposent d'un patrimoine génétique commun ayant pour origine un groupe d'*Homo sapiens* qui a quitté l'Afrique il y a environ 100 000 ans (3).

Par ailleurs, en octobre 2016, à la suite d'analyses paléogénétiques, des chercheurs ont suggéré qu'un autre groupe d'*Homo sapiens* ait pu franchir le Sinaï et transmettre aux Néandertaliens une part de son capital génétique mitochondrial dès - 220 000 ans (4). Une sortie précoce d'Afrique qui fait écho à l'élargissement de l'échelle temporelle provoqué par la découverte de Jebel Irhoud. Grâce à ces données, complétées par des études climatiques qui montrent qu'à de nombreuses reprises, entre - 300 000 et - 50 000 ans, le Sahara était vert et propice à des déplacements de populations, la théorie du « Out of Africa » n'a jamais été aussi forte et bien établie. ■

(1) J.-J. Hublin et al., *Nature*, 546, 289, 2017.

(2) R. Grün et al., *Nature*, 382, 500, 1996.

(3) S. Mallick et al., *Nature*, 538, 201, 2016.

(4) C. Posth et al., *Nat. Commun.*, 8, 16046, 2017.

Et aussi...



▲ Reconstitution du plus grand cratère d'impact de météorite jamais repéré à la surface de la Terre.

L'impact qui aurait tué les dinosaures

En mars 1991, près du village de Chicxulub, sur la péninsule du Yucatán, au Mexique, le planétologue canadien Alan Hildebrand découvre le plus grand cratère d'impact de météorite jamais repéré à la surface de la Terre. Sa forme et sa taille – au

moins 180 kilomètres de diamètre – ont été révélées par des anomalies du champ magnétique, qui traduisent la présence de roches riches en fer d'origine cosmique, ainsi que par des anomalies du champ de gravitation. Elles s'expliqueraient par un déficit de masse qui

résulterait de la fusion et de la projection d'une grande quantité de matière lors de l'impact. Le cratère, enfoui sous plus de 1 000 mètres de sédiments, est indécélable à l'œil nu. Le Prix Nobel de physique 1968 Luis Alvarez, et son fils Walter, géologue, s'emparent de la

découverte. Chicxulub serait, à leurs yeux, le cratère qu'ils cherchent depuis qu'ils ont découvert, dix ans auparavant, que les sédiments terrestres âgés de 65 millions d'années sont anormalement enrichis en iridium. Selon eux, cet iridium proviendrait d'une météorite géante qui aurait entraîné la disparition des dinosaures et de nombreuses autres espèces. Que le site soit un cratère d'impact ne fait aucun doute. Les forages effectués dans la structure depuis les années 1990 contiennent les traces d'une collision. Mais la question de son âge et, a fortiori, de son lien avec l'extinction de masse à la fin de l'ère secondaire reste débattue. La paléontologue américaine Gerta Keller affirme en effet que cette extinction est en rapport avec l'intense activité volcanique survenue à la même époque, dans ce qui est aujourd'hui la péninsule indienne. ■

Denisova, une nouvelle lignée identifiée grâce à l'ADN

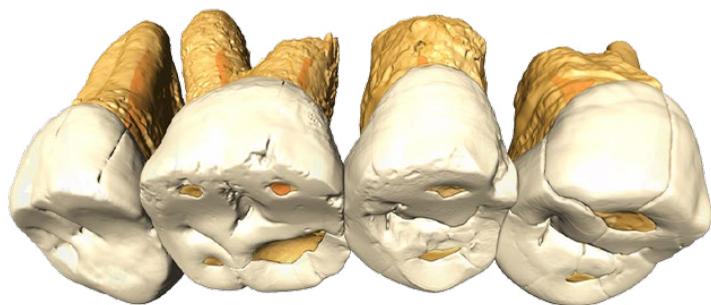
En 2010, l'équipe du généticien Svante Pääbo, à l'Institut Max-Planck de Leipzig, en Allemagne, séquence l'ADN d'une phalange d'enfant retrouvée en 2008 dans la grotte de Denisova, dans le sud de la Sibérie. Un site occupé il y a plus de 50 000 ans et entre 30 000 et 16 000 ans. Surprise: il s'agit d'une fille qui appartient à une population inconnue, dont le plus proche parent est Néandertal (1). L'existence de cette lignée n'a pu être mise en évidence que grâce à la génétique.

Cette fillette n'était pas une Néandertalienne, car l'équipe a comparé son ADN avec ceux d'autres Néandertaliens en Espagne, en Allemagne et en Russie. Résultat: tous les ADN néandertaliens étaient nettement différents. Les généticiens en ont conclu que la population qui vivait à Denisova était une lignée sœur des Néandertaliens. Elle appartenait initialement à une même population, qui s'est séparée des ancêtres des hommes actuels vers 800 000 ans. ■

(1) D. Reich et al., *Nature*, 468, 1053, 2010.



▲ C'est en analysant l'ADN de cette phalange d'enfant retrouvée en 2008 en Sibérie qu'une nouvelle population a été découverte.



▲ Une demi-douzaine de dents d'*Homo luzonensis* ont été retrouvées.

La famille Homo s'agrandit

2019 *Sapiens*, Neandertal, Denisova, *Floresiensis*... à ces quatre espèces d'hominidés qui peuplaient la Terre il y a au moins 100 000 ans, il faut aujourd'hui en rajouter une nouvelle: *Homo luzonensis*. Quelques phalanges, une demi-douzaine de dents et un bout de fémur, découverts en 2007 dans la grotte de Callao, aux Philippines, ont été identifiés en 2019 comme des fossiles appartenant à un nouvel *Homo*, *Homo luzonensis*. Cet homme, dont le visage nous reste inconnu, vivait entre 50 000 et 67 000 ans sur l'île de Luçon. En avril 2019, l'article de Florent Détroit, paléontologue au Musée de l'homme, à Paris, fait la une de *Nature* (1). ■

(1) F. Détroit et al., *Nature*, 568, 181, 2019.

Les plus vieux outils du monde

2015 Cent quarante-neuf outils de pierre! Des roches débitées, des éclats tranchants, des enclumes et des « marteaux »: c'est la découverte exceptionnelle faite dans l'ouest du Kenya et détaillée en mai 2015 par l'équipe du West Turkana Archeological Project (1). Après analyse, il s'agirait des outils les plus anciens jamais découverts. La strate géologique dans laquelle ces vestiges ont été trouvés est estimée à 3,3 millions d'années, et les méthodes de data-

tion employées par l'équipe confirment cet âge. Or il y a 3,3 millions d'années, aucun représentant du genre *Homo* n'avait fait son apparition: le plus vieux fossile apparenté à notre genre est en effet estimé à 2,8 millions d'années. Qui est donc l'artisan des outils? *Kenyanthropus platyops* ou *Australopithecus afarensis*, qui vivaient dans la région il y a 3,3 millions d'années? Une chose est en tout cas certaine: ces outils remettent en question l'idée bien établie selon laquelle le genre *Homo* serait l'inventeur des premières formes de technique. ■

(1) S. Harmand et al., *Nature*, 521, 310, 2015.

Une petite femme sur une petite île

2004 Le 28 octobre 2004, un article de la revue *Nature* met en émoi les anthropologues: il présente une nouvelle espèce humaine, qui aurait vécu jusqu'il y a 18 000 ans (1). Surtout, le squelette type est à peine plus grand qu'un enfant de 3 ans et a la capacité crânienne d'un chimpanzé, bien qu'il ait appartenu à un adulte, comme en témoignent ses dents de sagesse! Exhumé par une équipe australo-indonésienne sur l'île de Florès, dans l'est de l'Indonésie, le squelette quasi complet du nouvel hominidé, baptisé *Homo floresiensis*, est celui d'une femme. Il possède une combinaison de caractères inédits. Son mètre de haut et les 380 cm³ de sa boîte crânienne le rapprocheraient plutôt des Australopithèques, qui vivaient il y a 4 à 2 millions d'années. Mais sa bipédie, la morphologie de sa face, la taille de ses dents, la finesse et la proportion de son squelette l'apparentent sans conteste au genre *Homo*. D'après ses découvreurs, ce « micro-adulte », dépourvu de menton, descendrait d'*Homo erectus*, dont la présence est connue sur l'île de Java il y a près de 1,6 million d'années. Reste à expliquer les proportions lilliputiennes d'*Homo floresiensis*. Les auteurs avancent l'hypothèse d'un nanisme insulaire, phénomène bien connu chez les grands mammifères en situation d'isolat: la limitation des ressources sur un territoire exigu privilégie les petites tailles et l'absence de prédateurs autorise cette évolution. ■

(1) P. Brown et al., *Nature*, 431, 1055, 2004; M.-J. Morwood et al., *Nature*, 431, 1087, 2004.



▲ La découverte d'un squelette quasi complet d'une femme mesurant 1 m a révélé une nouvelle espèce: *Homo floresiensis* (reconstitution).

ENTRETIEN AVEC **ALIM-LOUIS BENABID**

STIMULER LES NEURONES POUR ADOUCIR LA MALADIE DE PARKINSON

De la stimulation cérébrale profonde pour traiter les symptômes de Parkinson à l'utilisation d'infrarouges pour enrayer la progression de la maladie, le neurochirurgien Alim-Louis Benabid revient sur une belle aventure scientifique.

Propos recueillis par **Mathias Germain**, journaliste

La Recherche Comment avez-vous découvert les effets de la stimulation cérébrale profonde à haute fréquence ?

Alim-Louis Benabid C'est en 1987, en préparant une opération chirurgicale chez une personne souffrant de tremblement essentiel, une maladie neurologique, que j'ai observé les effets de la stimulation électrique à haute fréquence. Cette opération vise à détruire une petite partie du thalamus, le noyau Vim, noyau central intermédiaire, ce qui permet de supprimer le tremblement. Pour repérer précisément ce noyau d'une dizaine de millimètres, on utilise une stimulation électrique à basse fréquence. Lorsqu'on déclenche un tremblement, on sait qu'on a localisé la cible à opérer. Or, en modulant les paramètres de ce stimulateur, je me suis aperçu que le patient arrêta de trembler quand j'augmentais la fréquence au-dessus de 100 hertz (1). Une surprise car, à cette époque, la stimulation électrique était connue pour ses effets excitateurs et non inhibiteurs.

Avez-vous immédiatement perçu l'intérêt de cette observation pour le traitement des symptômes de la maladie de Parkinson ?

Oui, car les tremblements font partie des trois symptômes importants de la maladie. En 1990, l'attention s'est portée sur le noyau subthalamique, dont le rôle dans le contrôle de la motricité venait d'être démontré par Mahlon DeLong, à l'université Emory, à Atlanta, aux États-Unis,

et par Tipu Aziz, à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, puis par Abdelhamid Benazzouz, à l'université de Bordeaux. Grâce à ces travaux, nous avons pu assez vite appliquer la technique chez des malades: le premier patient a été opéré à Grenoble en 1993. La stimulation cérébrale profonde présente le grand avantage d'être réversible, modulable et non destructrice (2).

Concrètement, en quoi consiste la stimulation cérébrale profonde ?

Le principe consiste à implanter deux électrodes très fines dans le noyau subthalamique de chaque hémisphère. Cela se fait grâce à la stéréotaxie, technique d'imagerie qui permet de définir une position très précise dans l'espace et de faire une chirurgie mini-invasive. Les deux électrodes sont reliées à une batterie, comme un pacemaker, placée sous la peau du patient au niveau de la clavicule. La stimulation est réglée en haute fréquence, 130 hertz, avec un voltage entre 1 et 4 volts suivant le malade. C'est du sur-mesure. À peine le système calé, l'effet est spectaculaire: le malade n'a plus de tremblements ni aucun des troubles moteurs qui apparaissent après plusieurs années de traitement médicamenteux.

À quel moment de la maladie la stimulation cérébrale profonde est-elle indiquée ?

En deuxième intention. Lorsque la maladie est diagnostiquée, le malade reçoit un traitement médicamenteux qui va pallier le déficit





ALIM-LOUIS BENABID

1987 Il découvre des effets de la stimulation cérébrale profonde à haute fréquence sur la maladie de Parkinson.
1988-2006 Il dirige l'unité de recherche Inserm Neurobiologie préclinique.

1989-2005 Il est chef du service de neurochirurgie au CHU de Grenoble.
1993 Il traite le premier malade parkinsonien par stimulation cérébrale profonde.

2009 Il lance le projet de laboratoire Clinatoc, à Grenoble.
2014 Il reçoit le prix de la fondation Lasker pour la recherche médicale.
2015 Il est lauréat du Breakthrough Prize.

de dopamine dans le cerveau. La maladie correspond à une destruction des neurones qui produisent cette molécule. Il s'agit d'un neurotransmetteur essentiel pour les neurones des noyaux gris centraux, comme le thalamus. Privés de dopamine, les neurones de ces noyaux ne peuvent plus correctement transmettre l'influx nerveux. Cela provoque des dysfonctionnements dans le contrôle des mouvements, comme une lenteur (akinésie), une rigidité musculaire qui bloque les articulations, et des tremblements des mains et des pieds au repos. Ces troubles affectent aussi le visage, notamment les muscles liés à l'élocution. Les symptômes apparaissent lorsque 70 % environ des neurones de la substance noire (*) ont été détruits.

Sait-on précisément comment la stimulation cérébrale profonde agit sur les neurones ?

Tout ce que l'on sait, c'est que cela marche... Mais on ne connaît pas les mécanismes. On sait

que cette stimulation interfère beaucoup avec les circuits de neurones qui utilisent la dopamine et qu'elle ne crée pas de lésion ni de modification organique (3). Tout le monde cherche à comprendre. Pour moi, toute une série de mécanismes agissent conjointement et simultanément. Il faut préciser que la stimulation électrique n'est pas un phénomène qui agit seulement tout au bout de la pointe de l'électrode... Elle a une action diffuse. Or, dans ces zones du cerveau, il existe une grande variété de cellules: il y a des neurones de différentes catégories, qui fonctionnent avec différents types de neurotransmetteurs, des synapses, des fibres... Et nous, on arrive dans cette zone avec nos « orages électriques »! Donc on influence beaucoup de choses. J'ai proposé qu'on parle d'inhibition fonctionnelle, car les neurones qu'on stimule ne fonctionnent plus ensemble, ils semblent inhibés. Cameron McIntyre, de l'université Case ●●

(*) **La substance noire** est un noyau du système nerveux dont une partie est atteinte lors de la maladie de Parkinson.

••• Western Reserve à Cleveland, aux États-Unis, qui travaille sur ces questions, parle de « lésion informationnelle » : la stimulation interromprait le passage de signaux anormaux dans les noyaux cérébraux (4). Cela agirait comme un brouillage.

Quelle est la durée des effets bénéfiques de la stimulation cérébrale profonde ?

Si la stimulation est stoppée, les effets bénéfiques ne durent qu'une ou deux secondes ! La réversibilité est totale. C'est une des raisons du succès de la méthode. Cela a permis de cibler des zones réputées intouchables, comme le noyau subthalamique. Une hémorragie dans ce noyau provoque l'hémiballisme, mouvements anormaux involontaires de projection en avant de la racine des membres, très brusques, très épuisants ! Des cas de décès par épuisement ont été décrits... Ensuite, tant que la stimulation (bien réglée) est maintenue, les effets bénéfiques durent... Le problème est que nous agissons seulement sur les symptômes. Pendant ce temps, la maladie

De quoi s'agit-il ?

À l'instar de la stimulation électrique, nous utilisons un dispositif placé à l'intérieur du cerveau. Mais, pour stimuler les neurones, cette technique diffuse des rayons proches de l'infrarouge, c'est-à-dire de la lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 600 et 1 000 nanomètres. Nos travaux ont montré que l'exposition des neurones producteurs de dopamine à ce type de rayonnement stimule leur métabolisme.

Comment avez-vous procédé ?

Nous avons réalisé cette expérience sur des souris et leur avons injecté une toxine, le MPTP, qui s'attaque aux neurones dopaminergiques de la substance noire. Elles ont ainsi les symptômes de la maladie de Parkinson. Une partie de ces animaux ont été exposés à des lampes diffusant un rayonnement proche de l'infrarouge. Résultat : nous nous sommes aperçus que les animaux exposés perdaient beaucoup moins de neurones dans la substance noire que les autres, entre 35 et 45 % (5). Forts de ce résultat, nous nous sommes lancés dans une série d'expérimentations avec l'objectif d'accéder à une application chez l'homme.

Une source externe de rayonnement infrarouge est-elle capable d'atteindre la substance noire chez l'homme ?

Non, des rayons diffusés par une lampe externe ne pénètrent pas suffisamment en profondeur dans le cerveau pour que les deux substances noires soient exposées. Celles-ci sont à 10, 12 centimètres de profondeur, donc il nous a fallu imaginer comment procéder. C'est là que mon expérience de la stimulation électrique a servi. J'avais développé des techniques mini-invasives pour faire de la stimulation cérébrale en plein milieu du cerveau. Nous les avons donc utilisées chez la souris (6), puis chez le singe.

Quel est le dispositif technique ?

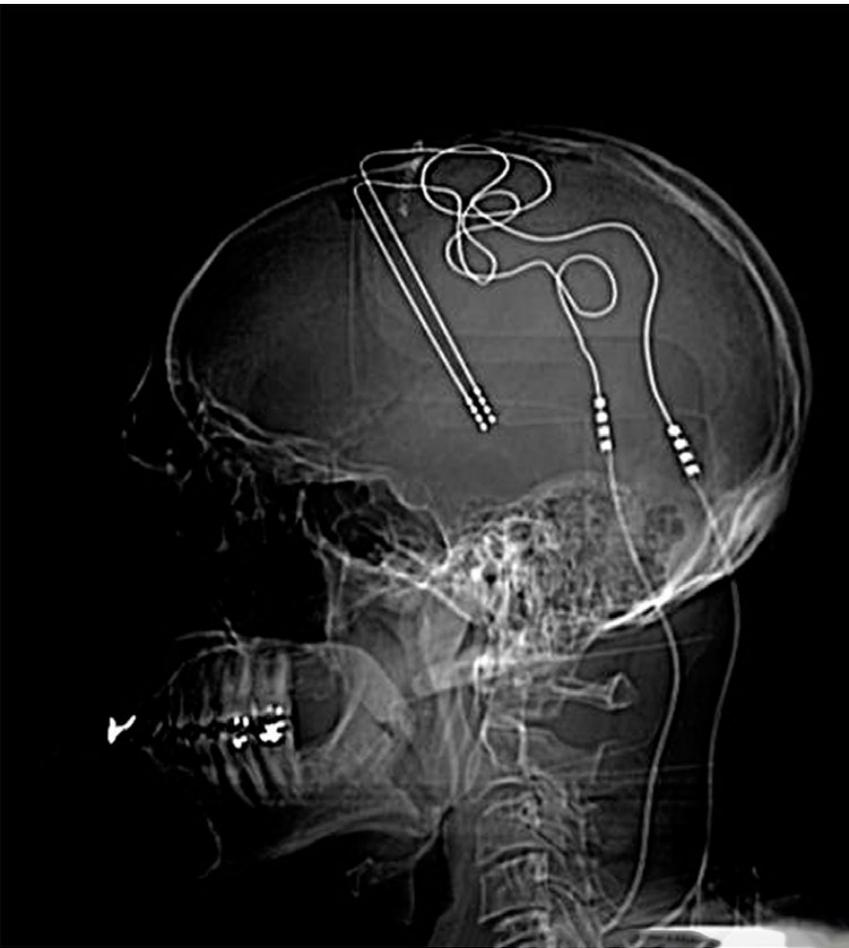
De façon schématique, nous implantons une fibre optique connectée à une source laser, elle-même connectée à une batterie qui est la même que celle que nous utilisons pour la stimulation cérébrale profonde. La fibre est implantée en direction du troisième ventricule, une cavité située entre les deux hémisphères cérébraux, pile sur la ligne médiane, à hauteur des deux noyaux de la substance noire à droite et à gauche, qui comportent les cellules dopaminergiques. La cible n'est plus le noyau subthalamique, mais les substances noires.

« Chez les animaux qui reçoivent correctement les infrarouges, la perte neuronale est très minime »

continue d'évoluer. D'autres circuits de neurones sont atteints de dégénérescence, comme le système nerveux végétatif. Conséquence : des troubles digestifs, cardiaques, vésicaux apparaissent. Donc au fur et à mesure de la dégénérescence, on voit apparaître un cortège de symptômes qui touchent des secteurs différents du corps et qui ne répondent ni à la pharmacologie, ni à la stimulation cérébrale à haute fréquence.

Jusqu'à présent, aucun traitement ne peut bloquer le développement de la maladie ?

Plusieurs travaux de recherche sont menés pour trouver un traitement. En particulier de quoi empêcher les neurones producteurs de dopamine de dégénérer. Obtenir cet effet neuroprotecteur est devenu le Graal des neurologues. Tout le monde cherche. Et il y a beaucoup de pistes, comme la thérapie génique. De notre côté, en 2010, nous avons découvert, avec John Mitrofanis, de l'université de Sydney, quelque chose de très intéressant : l'illumination à l'aide de rayonnements proches de l'infrarouge.



profonde. Nous savons que la mort d'un neurone est associée à une dégradation de ses mitochondries, usines énergétiques des cellules. Or les mitochondries contiennent des enzymes photosensibles, comme la cytochrome c oxydase. C'est un peu comme la chlorophylle chez les plantes, qui absorbe la lumière et fabrique de l'énergie. Dans le cas des mitochondries, la cytochrome c oxydase absorbe la lumière dans la bande du proche infrarouge. Ce phénomène stimule la chaîne de transport des électrons et cela augmente la production d'ATP, molécule qui fournit l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme des cellules. Autrement dit, le rayonnement infrarouge redonne de l'énergie aux neurones producteurs de la dopamine de la substance noire, attaqués par la maladie. Cela les empêche de mourir. On a donc un effet neuroprotecteur.

Le dispositif utilisé chez l'animal est-il applicable à l'homme ?

Il faudra l'adapter. Sur le principe, le modèle est identique à celui que nous avons fabriqué. Mais la fibre optique sera plus longue, pour atteindre le fond du troisième ventricule d'un cerveau humain. Chaque matériau doit résister le plus longtemps possible aux contraintes du milieu organique. Et il faudra que le dispositif réponde de façon encore plus drastique aux normes de sécurité et de biocompatibilité. Le prototype utilisé chez l'animal a été fabriqué à Clinathec, à Grenoble, avec la collaboration du Leti, laboratoire du CEA spécialisé dans les micro et nanotechnologies. Nous développons un dispositif utilisable chez l'homme, en espérant pouvoir prochainement débiter un essai clinique. ■

- (1) A.-L. Benabid *et al.*, *Appl. Neurophysiol.*, 50, 344, 1987.
- (2) P. Limousin *et al.*, *Lancet*, 345, 91, 1995.
- (3) P. Krack *et al.*, *N. Engl. J. Med.*, 349, 1925, 2003.
- (4) A. Chaturvedi *et al.*, *J. Neural. Eng.*, 10, 056023, 2013.
- (5) V. Shaw *et al.*, *J. Comp. Neurol.*, 518, 25, 2010.
- (6) C. Moro *et al.*, *J. Neurosurg.*, 120, 670, 2014.

Quels résultats obtenez-vous ?

Il y a quelques mois, nous avons obtenu les résultats d'une expérience de plusieurs semaines chez le singe, chez qui on provoquait la maladie avec le MPTP. Les animaux qui reçoivent correctement les infrarouges ont pratiquement un comportement identique à la normale, et on constate une perte neuronale très minime, voire nulle. C'est un résultat assez incroyable.

Toutefois, les neurones sont touchés par la toxine MPTP, pas par la maladie de Parkinson...

Certes, ce n'est pas la maladie de Parkinson. Mais le MPTP est un des modèles les plus utilisés pour modéliser la maladie. En outre, sachez que nous avons aussi lancé des expérimentations avec d'autres modèles mimant la maladie de Parkinson en espérant démontrer que, là aussi, on ralentit ou stoppe la perte neuronale. C'est peut-être le début d'une belle aventure scientifique!

Cette fois, savez-vous ce qui se produit dans les neurones de la substance noire ?

Oui, même s'il reste beaucoup de choses à comprendre, on a une meilleure explication du mécanisme par rapport à la stimulation cérébrale

▲ *La stimulation cérébrale profonde consiste à implanter, dans le cerveau d'un patient atteint de Parkinson, des électrodes reliées à une batterie. Celle-ci délivre un courant électrique qui va stimuler des neurones pour arrêter les tremblements.*

Et depuis ●●●

2016

Alim-Louis Benabid reçoit le Prix de l'inventeur européen à Lisbonne dans la catégorie « recherche », remis par l'Office européen des brevets depuis 2006.

2019

L'implant cérébral d'Alim-Louis Benabid et son équipe permet durant deux ans à un patient tétraplégique de se déplacer en commandant un exosquelette.

ENTRETIEN AVEC **JEAN-PIERRE CHANGEUX**

L'ÉMERGENCE D'UNE SCIENCE UNIFIÉE DE L'ESPRIT

De la biologie moléculaire aux sciences sociales, la convergence entre plusieurs disciplines qui s'intéressent au cerveau donne naissance aux neurosciences et fait tomber au passage plusieurs dogmes. Rencontre avec un pionnier de la spécialité.

Propos recueillis par **Marie-Laure Théodule**

La Recherche Quelle est la principale avancée de la décennie 2000-2010 en matière de neurosciences ?

Jean-Pierre Changeux La caractéristique principale des sciences du cerveau durant cette décennie, c'est qu'elles se sont développées sur plusieurs fronts à la fois, de la biologie moléculaire aux sciences sociales, en passant par les niveaux neuronal et cognitif avec l'imagerie cérébrale. Ce qui constitue la véritable révolution, c'est le fait que des disciplines qui s'intéressaient avant au cerveau de manière autonome (anatomie, physiologie, biochimie, pharmacologie, psychologie, etc.) se sont rapprochées pour donner naissance à une science unifiée de l'esprit, « la » neuroscience. C'est à l'aube du XXI^e siècle que cette alchimie a commencé à opérer, notamment grâce à l'essor de la biologie moléculaire : selon moi, cette discipline a joué le rôle de ferment parce qu'il est dans son essence de tenter d'établir des liens de causalité entre les niveaux moléculaires et cognitifs.

Pouvez-vous donner un exemple de ce rôle de catalyseur joué par la biologie moléculaire ?

Considérons notre conception des maladies mentales. Encore récemment, on décrivait des maladies comme la schizophrénie, l'autisme, la dépression essentiellement par leurs symptômes, que l'on considérait comme provoqués par des facteurs psychologiques et environnementaux. On connaissait mal la cible d'action des agents pharmacologiques efficaces sur ces symptômes.

Et les familles des personnes souffrant de ces pathologies étaient souvent mises en cause. Or des gènes de prédisposition à la schizophrénie sont découverts dès 2001, par Daniel Weinberger et son équipe des National Institutes of Health, aux États-Unis. En 2003, une équipe internationale, à laquelle participe Thomas Bourgeron, de l'Institut Pasteur, identifie les premiers gènes de vulnérabilité à l'autisme. Ils jouent un rôle critique dans le développement des synapses, les connexions entre les neurones. La même année, une équipe finlandaise identifie ROBO1, un gène impliqué dans la dyslexie. Depuis, de nombreux gènes de ce type ont été identifiés. Si bien qu'aujourd'hui, on considère que beaucoup de maladies mentales sont en partie d'origine génétique, ce qui constitue un très grand changement dans leur conception : non seulement les familles et les malades sont déculpabilisés, mais cela ouvre des portes pour comprendre les mécanismes de ces maladies et trouver de nouveaux traitements.

Cette manière d'étudier le cerveau a-t-elle fait tomber d'autres dogmes ?

Certainement, ainsi une des grandes découvertes récentes est la mise en évidence que de nouveaux neurones naissent en permanence dans le cerveau adulte. Auparavant, on croyait que nous naissions avec un nombre définitif de neurones. Or, en 2003, Pierre-Marie Lledo et son équipe de l'Institut Pasteur ont réussi à comprendre cette neurogenèse au niveau cellulaire. Ils ont démontré que certaines catégories de



cellules gliales se transforment en neurones, et que ces neurones arrivent à se développer et à se reconnecter non seulement à quelques neurones voisins, mais à tout un réseau fonctionnel dans le bulbe olfactif: ces neurones sont attirés dans cette région par une molécule sécrétée par le bulbe olfactif. En 2008, la même équipe a montré que cette neurogenèse s'intensifiait à la suite d'une lésion ayant entraîné la perte du sens olfactif. Ils ont donc pu établir un lien causal entre les niveaux moléculaire et cognitif de l'olfaction. C'est une avancée spectaculaire qui ouvre les portes de la régénération fonctionnelle: on saura peut-être un jour reconstruire des territoires lésés en utilisant des cellules souches chez l'adulte, pour traiter par exemple la maladie d'Alzheimer.

Et l'imagerie cérébrale, quel a été son apport ?

Sur le plan technique, il y a une innovation très intéressante: l'imagerie par tenseur de diffusion. Elle a commencé à être utilisée au tournant des années 2000, bien qu'elle ait été développée plusieurs années avant par Denis Le Bihan, directeur de NeuroSpin, à Orsay. Cette technique révolutionnaire, qui repose sur la diffusion d'eau dans les tissus cérébraux, permet de voir en trois dimensions les connexions entre différents territoires du cerveau. Elle commence à être utilisée pour visualiser les réseaux altérés après un accident vasculaire cérébral. Couplée à l'IRM fonctionnelle, elle a permis de montrer que deux régions qui s'activent lors d'une tâche de vision, que le stimulus soit perçu consciemment ou non, sont massivement interconnectées.

L'imagerie fonctionnelle n'a-t-elle pas aussi permis d'explorer la conscience ?

Effectivement, l'imagerie fonctionnelle rend possible l'étude scientifique des processus conscients. Ainsi, avec Stanislas Dehaene, aujourd'hui professeur au Collège de France, nous avons formulé en 1998 une théorie sur la conscience dont l'imagerie fonctionnelle permet la mise à l'épreuve. Cette théorie se fonde sur l'idée que, dans notre cortex cérébral, les neurones pyramidaux à axone long forment un réseau qui interconnecte de multiples territoires cérébraux donnant naissance à un espace de travail conscient. Et que la synchronisation entre ces neurones permet à la conscience d'émerger. Or cette théorie a débouché sur des expériences visant à observer les différences cérébrales entre les traitements conscients et non conscients. En



JEAN-PIERRE CHANGEUX

1964 Il obtient son doctorat en sciences naturelles sous la direction de Jacques Monod.
1972 Il dirige l'unité de neurobiologie

moléculaire de l'Institut Pasteur.
1976 Il enseigne au Collège de France.
1983 Il publie *L'Homme neuronal*, livre fondateur de « la » neuroscience.

2001, Stanislas Dehaene et ses collaborateurs ont montré à l'aide de l'imagerie fonctionnelle que nous pouvons percevoir le sens d'un mot sans que nous ayons eu conscience de le voir: dans ce cas, les territoires du cerveau qui s'activent diffèrent de ceux mis en œuvre par un traitement visuel conscient. Parallèlement, l'imagerie cérébrale a permis d'avancer sur un autre terrain en rapport avec la conscience, celui de l'empathie et des relations sociales, notamment grâce aux travaux de Chris Frith, de l'University College de Londres. Il a constaté que des régions cérébrales identiques s'activaient chez deux individus qui entrent en résonance émotionnelle, et que cette capacité faisait défaut aux schizophrènes. Autre exemple, en 2003, Bruno Wicker, de l'Institut des neurosciences cognitives de la Méditerranée, a montré que si une personne en observe une autre exprimant du dégoût, elle active les mêmes régions cérébrales que cette dernière.

L'étude cérébrale des relations sociales, serait-ce la voie de l'avenir ?

En effet, je pense que l'on assiste aux prémices d'une nouvelle synthèse entre la neuroscience et les sciences humaines et sociales, et que cette convergence sera essentielle pour vaincre les maladies mentales et mieux comprendre l'être humain. ■

Et depuis ●●●

-
- **2013**
- À l'université de Kyoto, au Japon, l'équipe de Tomoyasu Horikawa met au point un logiciel qui catégorise les rêves à partir de l'activité du cortex visuel durant le sommeil.
- Sid Kouider, du laboratoire de sciences cognitives de l'École normale supérieure, à Paris, montre que la conscience perceptive visuelle est présente chez le bébé dès l'âge de 5 mois.

L'OPTOGÉNÉTIQUE EN PLEINE LUMIÈRE

Modifier des cellules pour les rendre sensibles à la lumière : c'est le principe de l'optogénétique. Conçue pour étudier le cerveau, cette technique est désormais utilisée dans d'autres organes et servira peut-être demain à soigner.

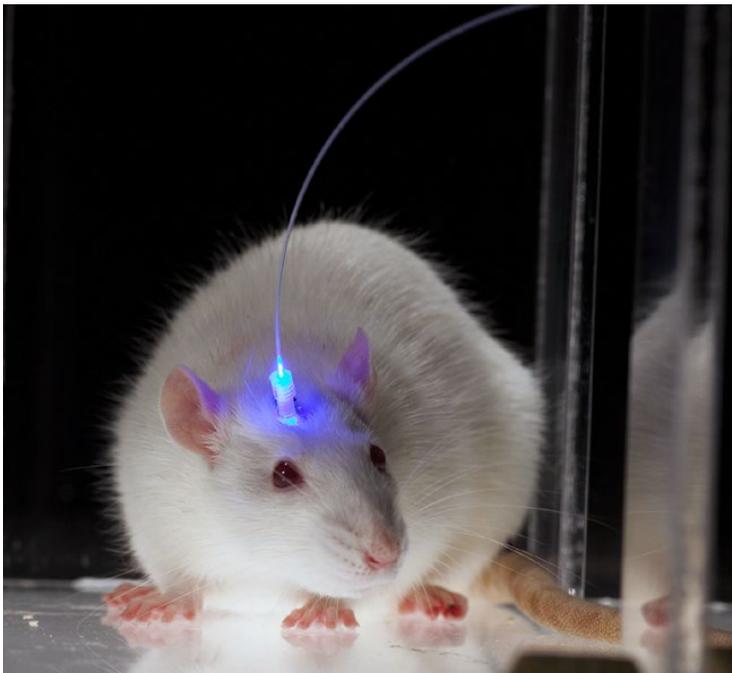
Pascaline Minet, journaliste

Rendre la vue à des souris aveugles : c'est aujourd'hui possible, pour une forme de cécité liée à un mauvais fonctionnement des cellules de la rétine. En y insérant un gène issu d'une bactérie, des biologistes savent leur redonner une sensibilité à la lumière. En 2011, un essai de cette technique a été fait sur des singes – en attendant, si cela fonctionne, de passer à l'homme.



Cette approche thérapeutique novatrice est fondée sur une technique sortie des laboratoires de biologie : l'optogénétique. Celle-ci consiste à modifier génétiquement des cellules afin de les rendre réactives à la lumière. On peut alors les activer ou bloquer leur activité simplement en les éclairant. L'optogénétique a d'abord été utilisée pour étudier le fonctionnement du cerveau, en modifiant des neurones. Mise au point il y a moins de dix ans, elle a remporté un franc succès, et des centaines de laboratoires de neurosciences l'emploient aujourd'hui. Mais les biologistes ne s'arrêtent pas là : ils commencent à étendre son usage à l'étude d'autres organes.

L'idée de contrôler l'activité des neurones pour étudier leur rôle est ancienne. Dans les années 1950, le physiologiste José Delgado implantait des électrodes dans le cerveau de différents animaux et parvenait ainsi à modifier leur comportement. Dans une expérience célèbre, il était même parvenu à arrêter un taureau en train de charger ! Cependant, José Delgado implantait ses électrodes à l'aveugle, sans savoir précisément quels neurones il stimulait. Afin de mener des études plus fines sur le fonctionnement du cerveau, il fallait inventer une méthode qui permette d'activer certains neurones sans toucher aux autres. C'est un biologiste autrichien, Gero Miesenböck, qui trouve le moyen d'y parvenir. Au début des années 2000, ce spécialiste de la mouche drosophile travaille à l'université américaine Yale. « J'utilisais des colorants codés génétiquement, comme la protéine fluorescente GFP, qui me permettaient de suivre en direct l'activité neuronale chez les mouches ; j'ai alors pensé qu'il serait



▲ En implantant une fibre optique dans le crâne de souris, l'équipe de Karl Deisseroth, de l'université Stanford, a pu stimuler certains neurones grâce à un flash lumineux.

intéressant d'effectuer la démarche inverse, c'est-à-dire de contrôler directement l'activité des neurones dans le cerveau », raconte-t-il.

Il s'intéresse alors à une protéine issue de la rétine de la mouche, la rhodopsine. Celle-ci a la particularité de réagir à la lumière en activant l'ouverture de canaux ioniques dans la membrane des cellules rétinienne. Le flux d'ions qui en résulte modifie la charge électrique de ces cellules. Gero Miesenböck a l'idée de transférer le gène codant la rhodopsine dans des neurones de rat en culture. En fabriquant cette protéine, les neurones deviennent sensibles à la lumière : quand le biologiste expose ses boîtes de culture à des flashes lumineux, les neurones génétiquement modifiés produisent des signaux électriques (1).

PROMETTEUR EN OPHTALMOLOGIE

Dans un premier temps, cette nouvelle méthode passe relativement inaperçue. Elle nécessite en effet d'insérer, en plus du gène de la rhodopsine, plusieurs gènes auxiliaires, codant d'autres protéines intervenant dans la vision de l'insecte, ce qui rend la tâche assez compliquée. Il faut attendre 2005 pour qu'une nouvelle approche simplifiant considérablement l'usage de l'optogénétique soit mise au point. Cette année-là, Karl Deisseroth, de l'université américaine Stanford, Edward Boyden et Feng Zhang, aujourd'hui au MIT, dans le Massachusetts, réussissent grâce à un seul gène à rendre des neurones photosensibles. Ils utilisent pour cela « canal rhodopsine-2 » ou Chr2 (2). Cette protéine, issue de l'algue unicellulaire *Chlamydomonas reinhardtii*, est un canal ionique qui traverse de part en part la membrane de la cellule. Lorsqu'il reçoit de la lumière bleue, il y ouvre un passage pour l'entrée d'ions sodium. Les neurones génétiquement modifiés pour produire cette protéine changent de polarité (*) sous l'effet de la lumière, ce qui donne naissance à un message nerveux.

Pendant ce temps, Gero Miesenböck poursuit son travail avec ses propres « interrupteurs » optogénétiques. En 2005, il est le premier à prouver l'efficacité de sa technique chez l'animal vivant. Il transfère des protéines photosensibles chez la mouche et parvient à déclencher un réflexe de fuite grâce à un simple flash lumineux (3).

Deux ans plus tard, Karl Deisseroth et son équipe utilisent la protéine canal rhodopsine-2 chez des souris vivantes. Ils sensibilisent à la lumière

certaines de leurs neurones, impliqués dans la régulation du sommeil, et implantent une fibre optique dans leur crâne, afin d'y conduire de la lumière. Ils parviennent ainsi à les éveiller grâce à un flash lumineux dans le cerveau (4).

Surtout utilisée jusqu'à présent en neurosciences, l'optogénétique a toutefois un potentiel beaucoup plus important. Des biologistes issus d'horizons variés ont commencé à l'utiliser dans leurs travaux. Dès 2010, des études ont révélé les possibilités de l'optogénétique en cardiologie, quand des chercheurs sont parvenus à stimuler l'activité cardiaque chez des poissons zèbres et chez des souris vivantes. En 2011, la biologiste Emilia Entcheva, de l'université américaine Stony Brook, a eu l'idée de coupler des cellules réactives à la lumière avec des cellules musculaires cardiaques, ce qui a permis de contrôler la contraction d'un tissu cardiaque de rat in vitro. L'équipe de Martin Fussenegger, du département de science et d'ingénierie des systèmes biologiques de l'École polytechnique fédérale de Zurich, a, elle, utilisé l'optogénétique pour stimuler la fabrication d'insuline chez des souris diabétiques (5).

C'est dans un autre domaine, celui de l'ophtalmologie, que l'optogénétique pourrait le plus vite aboutir à un traitement. Comme on l'a vu, cette technique a déjà permis de rétablir une perception visuelle chez des souris aveugles. Celles-ci souffraient d'une forme murine d'une maladie héréditaire, la rétinopathie pigmentaire, qui entraîne une dégénérescence de cellules de la rétine, et aboutit à une perte irréversible de la vision. Cette approche représenterait un grand progrès pour les personnes qui souffrent de pathologies dégénératives de la rétine, car elle devrait leur offrir une vision plus nette que les implants électroniques actuels. Reste à s'assurer de son innocuité : l'introduction d'un gène étranger dans l'œil n'a rien d'anodin.

Le fait de modifier génétiquement les cellules pour pouvoir les commander par la lumière constitue l'un des principaux obstacles au développement de thérapies optogénétiques chez l'être humain. Quoi qu'il en soit, la méthode a déjà prouvé qu'elle était un formidable outil de compréhension des mécanismes physiologique ■

(1) B. V. Zemelman *et al.*, *Neuron*, 33, 15, 2002.

(2) E. S. Boyden *et al.*, *Nat. Neurosci.*, 8, 1263, 2005.

(3) S. Lima *et al.*, *Cell*, 121, 141, 2005.

(4) A. Adamantidis *et al.*, *Nature*, 450, 420, 2007.

(5) Y. Haifeng *et al.*, *Science*, 332, 1565, 2011.

(*) **Les neurones au repos sont polarisés**, c'est-à-dire qu'il existe une différence de charge électrique entre l'intérieur et l'extérieur de ces cellules.

Et depuis ● ● ●

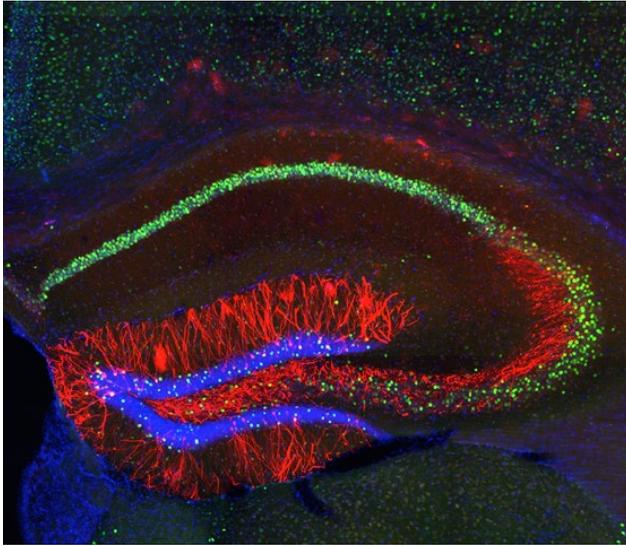


● — 2017

Une équipe de l'Institut de la vision, à Paris, valide la thérapie optogénétique sur des tissus rétinien de macaques et d'humains post-mortem.



Et aussi...



▲ Ces neurones de souris (en rouge) ont été stimulés par optogénétique pour induire un souvenir précis dans le cerveau des rongeurs.

La fabrique des faux souvenirs

2013 Notre mémoire n'est pas toujours fiable. De nombreuses expériences de psychologie l'ont démontré : on peut fabriquer de faux souvenirs en suggérant qu'ils se sont réellement passés. Ainsi, en 2008, la psychologue américaine Elizabeth Loftus réussit à induire un dégoût pour un aliment en suggérant un faux dégoût durant l'enfance. En l'occurrence, il s'agissait de glace à la fraise. La chercheuse, dont les travaux ont été contestés, entendait montrer que l'on peut changer des comportements alimentaires jugés néfastes. Mais que se passe-t-il dans le cerveau en présence d'un faux souvenir ? En 2013, l'équipe de Susumu Tonegawa (Prix Nobel de médecine en 1987) au MIT (États-Unis) a résolu cette énigme (1). En utilisant un modèle de souris transgénique victime de faux souvenirs, elle a montré que ceux-ci ont la même base physiologique que les vrais. Pour cela, les chercheurs ont d'abord appris aux souris à mémoriser une cage paisible, puis ils les ont placées dans une autre cage où elles recevaient des chocs électriques. Les souris ont mémorisé un vrai souvenir douloureux associé à cette seconde cage, mais au moment même où elles recevaient ces chocs, on a induit par optogénétique le souvenir de la première cage dans leur cerveau, en activant les neurones idoines. Résultat : une fois replacées dans la cage paisible, les souris se sont figées dans une attitude de peur, comme si elles avaient reçu aussi des chocs dans cette cage. Autrement dit, le cerveau traite le faux souvenir comme s'il était vrai. Ce qui accrédite a posteriori les travaux d'Elizabeth Loftus. ■

(1) S. Ramirez *et al.*, *Science*, 341, 387, 2013.

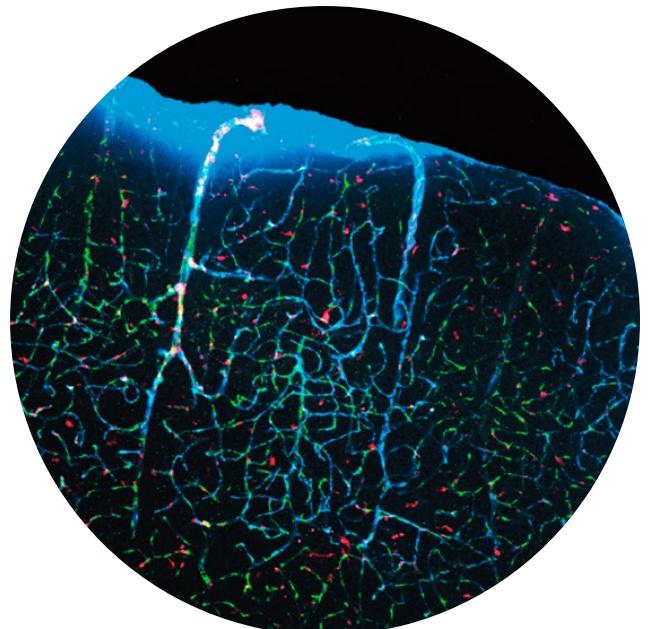
Le sommeil nettoie le cerveau

2013 Pourquoi passons-nous environ un tiers de notre vie à dormir ? On sait le sommeil indispensable à des fonctions cognitives de base comme, par exemple, la consolidation de la mémoire. Mais on ignorait son rôle biologique fondamental jusqu'à ce que Maiken Nedergaard, de l'université de Rochester (États-Unis), découvre que le sommeil sert à nettoyer le cerveau des déchets métaboliques accumulés par l'activité des neurones (1). En 2012, son équipe montre déjà, chez la souris, que le liquide cébrospinal dans lequel le cerveau circule entre les neurones pour évacuer vers le système veineux les déchets toxiques qu'ils produisent. Maiken Nedergaard nomme ce système « glymphatique », par analogie avec le système lymphatique qui, dans tout le reste du corps, utilise la lymphe pour évacuer dans le sang les

déchets toxiques des cellules. Puis, en 2013, son équipe révèle que l'essentiel de ce nettoyage cérébral a lieu pendant le sommeil. Les chercheurs observent en effet que l'espace interstitiel entre les neurones représente 14 % du volume du cerveau de la souris éveillée et 23 % de l'animal endormi. Ce qui facilite le nettoyage nocturne. Enfin, en 2019, une équipe de l'université de Virginie montre qu'une partie des déchets est évacuée via les vaisseaux lymphatiques des méninges vers les ganglions lymphatiques. Autant de découvertes qui soulèvent un espoir de traitement pour les maladies neurodégénératives, dont beaucoup sont liées à une accumulation de déchets dans le cerveau. ■

(1) J. J. Iliff *et al.*, *J. Neurosci.*, 33, 18190, 2013.

▼ Le liquide cébrospinal (en bleu) entre dans le cortex cérébral, où il récupère les déchets produits par les neurones et les évacue.





▲ Cette limace de mer, l'aplysie, apprend à ne plus replier sa branchie en renforçant la communication entre ses neurones au niveau des synapses.

Les mécanismes moléculaires de la mémoire

8 Une limace de mer, l'aplysie, va changer à jamais notre compréhension des bases moléculaires de la mémoire. En 1988, Eric Kandel, futur Prix Nobel de physiologie et de médecine en 2000, démontre que ce petit animal peut apprendre à ne plus replier son unique branchie, en dix essais par jour pendant quatre jours, en renforçant la communication entre ses neurones au niveau de leur zone d'échange, les synapses. Par la suite, Eric Kandel décrit de nombreuses caractéristiques de ce mécanisme dit de potentialisation à long terme (LTP), ainsi que du phénomène inverse, la dépression à long terme (LTD), qui

correspond à une diminution de l'activité synaptique impliquée dans les mécanismes de l'oubli. Aujourd'hui, on considère que le processus de mémorisation se déroule principalement au cours des heures qui suivent un apprentissage. À l'issue de cette période, appelée phase de consolidation, il serait plus difficile d'interférer avec le contenu des souvenirs. On a aussi démontré que le sommeil durant la nuit suivant un apprentissage contribue à le renforcer. Cependant, des études récentes indiquent que certaines protéines interviennent dans la mémoire à long terme plusieurs semaines, voire plusieurs mois après l'apprentissage. ■

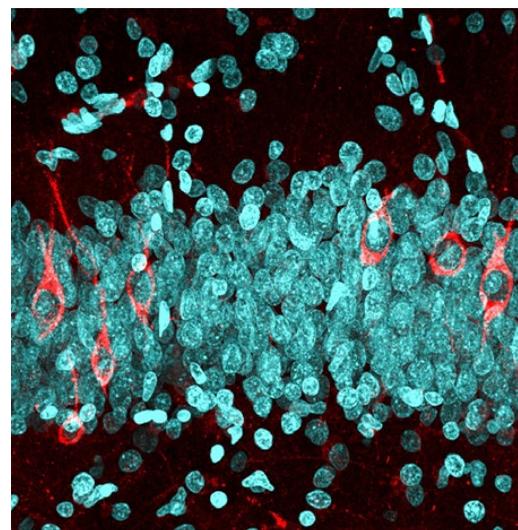
La neurogenèse contre vents et marées

8 Les dogmes ont parfois la vie dure. Jusqu'à fin du XX^e siècle, on croit, comme l'a décrété Ramón y Cajal, Prix Nobel de physiologie et de médecine en 1906, que le cerveau humain est bien trop complexe pour qu'il puisse se régénérer. Mais, dans les années 1960, plusieurs études montrent que de nouveaux neurones naissent chez des animaux – rat, canari et poisson zèbre. En 1998, Elizabeth Gould, de l'université Princeton (États-Unis), observe cette neurogenèse dans l'hippocampe et les bulbes olfactifs de singes marmousets adultes. La même année, le Suédois Peter Eriksson et l'Américain Fred Gage identifient une neurogenèse dans le gyrus denté des cerveaux de cinq adultes humains, analysés post mortem avec un produit de contraste qui révèle les cellules en division. Puis, en 2014, une

nouvelle étude de l'Institut Karolinska, en Suède, conduite par Jonas Frisén, indique que 700 neurones sont ajoutés chaque jour dans l'hippocampe adulte (1).

Le dogme de Ramón y Cajal semblait donc définitivement tombé quand, en 2018, une équipe américaine de l'université de Californie à San Francisco prétend avoir démontré que la neurogenèse s'arrête à l'âge de 13 ans. L'étude suscite un branle-bas de combat chez les neuroscientifiques dont de nombreux travaux portent sur l'utilité de la repousse neuronale. Un mois plus tard, une autre équipe américaine, de l'université Columbia, identifie la présence de nouveaux neurones même jusqu'à 79 ans. Depuis, plusieurs études sont venues bel et bien confirmer l'existence de la neurogenèse chez l'adulte, et ce jusqu'à un âge avancé. ■

(1) A. Ernst *et al.*, *Cell*, 156, 1072, 2014.



▲ Neurones immatures (en rouge) et matures (en bleu) dans le gyrus denté d'un adulte humain indiquent que le cerveau se régénère.

Maths & mat

Graphène, supraconducteurs haute température... des matériaux aux qualités étonnantes sont mis au point. Un phénomène quantique, la magnétorésistance géante, fait exploser la capacité des disques durs quand le Web banalise l'accès à l'information. Le boson de Higgs n'est plus un mythe et l'ordinateur quantique se profile.

Physique

La supraconductivité change de température	74
Et l'électronique devint grand public	78
Les neutrinos ont bien une masse	80
La téléportation d'atomes, une première!	86
Le graphène, matériau révolutionnaire	88
Ce boson de Higgs si attendu	92
Et aussi...	96

tière

Maths • Informatique

De la conjecture de Fermat au théorème	97
L'algorithme de Shor, clé du calcul quantique	100
L'art abstrait du réseau	101
La conjecture de Poincaré démontrée	102
Et aussi...	106

LA SUPRACONDUCTIVITÉ CHANGE DE TEMPÉRATURE

La découverte de nouveaux matériaux supraconducteurs au-delà de la température jugée limite de 30 kelvins relance la compétition dans ce domaine. Des théories tentent d'expliquer le phénomène.

Karl Alexander Müller et Johannes Georg Bednorz, physiciens

C'est en janvier 1986 que le premier indice tangible d'une possible supraconductivité à haute température a été découvert au laboratoire de recherche IBM de Zurich,

dans le village de Rüschlikon, en Suisse. En refroidissant un échantillon d'oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane, Johannes Georg Bednorz a constaté que la résistivité électrique de cet échantillon commençait à décroître rapidement à une température de l'ordre d'une vingtaine de kelvins. Puis, en changeant la concentration de baryum, on a pu observer ce début de décroissance à une trentaine de kelvins. Trente kelvins, cela correspond à -243 °C : c'est donc encore une température relativement basse. Mais, dans le domaine des supraconducteurs, cela représentait un progrès considérable que la plupart des physiciens n'attendaient plus.

Pendant treize ans, les plus hautes températures de transition à l'état supraconducteur étaient restées cantonnées autour de 23 kelvins. Aussi pouvait-on penser que la confirmation des résultats obtenus à Rüschlikon allait prendre quelque temps. C'était sans compter avec les vigoureux groupes de recherche qui avaient étudié auparavant la supraconductivité dans les oxydes de type Ba-Pb-Bi-O, comme celui de Tanaka à Tokyo, Chu à Houston et Batlogg aux laboratoires ATT-Bell. Même si, en 1986, ces groupes avaient réduit leurs efforts de recherche dans ce domaine, ils possédaient toujours une expertise et un équipement qui leur a permis de réagir assez rapidement. Le premier groupe à confirmer la découverte a été

celui du professeur Tanaka à Tokyo. En cherchant à reproduire les résultats publiés dans *Zeitschrift für Physik*, ils ont observé la chute de résistivité et le diamagnétisme (*) (1). De plus, leur analyse de la structure des composés corroborait les études de diffraction de rayons X. Cette confirmation des Japonais a déclenché un ouragan aux États-Unis. Aux laboratoires ATT-Bell, les chercheurs ont directement essayé de réaliser des composés de type La-Sr-Cu-O, en substituant le lanthane non plus par du baryum, mais par du strontium Sr^{2+} , dont le rayon ionique est très voisin de celui du lanthane La^{3+} . C'est ainsi qu'ils ont pu augmenter les températures critiques de quelques kelvins, réduire les largeurs des transitions et obtenir un effet Meissner (*) très significatif, de l'ordre de 60 % de la valeur idéale (2). Avec le même type de composés au strontium, une transition à une température très proche de 40 kelvins et d'une largeur de 2 kelvins seulement a aussi été observée par J.-M. Tarascon et ses collaborateurs, aux laboratoires américains Bellcore de Red Bank (3).

PRESSION HYDROSTATIQUE

Toujours dans le même ordre d'idées, à l'Académie des sciences de Pékin, le professeur Zhao Zhongxian et son équipe ont obtenu, à la fin de l'année 1986, une température critique de 42,6 kelvins, en optimisant la substitution du lanthane par le strontium et le baryum. À l'université de Houston, Chu et ses collaborateurs se sont, quant à eux, intéressés à l'effet de la pression sur les composés au baryum. Par application d'une pression hydrostatique, ils ont réussi à

(*) **Le diamagnétisme** d'un échantillon plongé dans un champ magnétique se traduit par une aimantation induite qui s'oppose et compense exactement le champ magnétique extérieur.

(*) **L'effet Meissner**, le flux magnétique, au départ présent dans l'échantillon, en est expulsé lorsque celui-ci devient supraconducteur.



porter à 52 kelvins la température où s'amorce la transition (4). Cela les a conduits à chercher à reproduire ces résultats à l'aide de pressions internes, c'est-à-dire en changeant la nature des ions. C'est ainsi qu'en remplaçant le lanthane par l'yttrium, ils ont effectivement trouvé une transition à 92 kelvins dans un système multiphase Y-Ba-Cu-O, en collaboration avec le groupe de M. K. Wu, de l'université d'Alabama, aux États-Unis. Leurs résultats ont d'abord été annoncés par conférence de presse, sans que soit toutefois dévoilée la composition du système supraconducteur, avant d'être finalement publiés (5). En un court laps de temps, plusieurs groupes ont trouvé des résultats comparables et ont pu isoler la phase supraconductrice $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ et déterminer sa structure.

Avec la famille des composés de type $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ou $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, cela reste jusqu'à présent les seules découvertes confirmées de supraconducteurs à haute température critique. Mais il n'est pas exclu que l'on puisse encore monter en température. Plusieurs équipes ont en

effet observé des chutes de résistivité, ainsi que des indications de diamagnétisme à des températures de l'ordre de 200 kelvins ou plus. Cependant, ces résultats ne sont pas reproductibles et disparaissent en quelques jours. Certains pensent qu'il s'agit tout simplement d'artefacts expérimentaux. Il semble que cela pourrait aussi provenir d'effets métastables se produisant lors de la synthèse des composés. Mais jusqu'à présent, personne n'a réussi à stabiliser les éventuelles phases qui seraient responsables des effets observés.

Quoi qu'il en soit, la grande question qui se pose encore au sujet des cas confirmés de supraconductivité est de savoir quelle est la nature exacte du phénomène à l'origine des hautes températures critiques. Autrement dit, le modèle classique de BCS (*) permet-il de comprendre les récentes découvertes? Ou bien faut-il faire appel à de nouvelles idées théoriques? À cet égard, une première caractéristique originale des supraconducteurs à haute température critique est d'être des supraconducteurs à « trous ». Habituellement, dans les métaux ou les ●●●

**KARL ALEXANDER MÜLLER
ET JOHANNES GEORG
BEDNORZ**

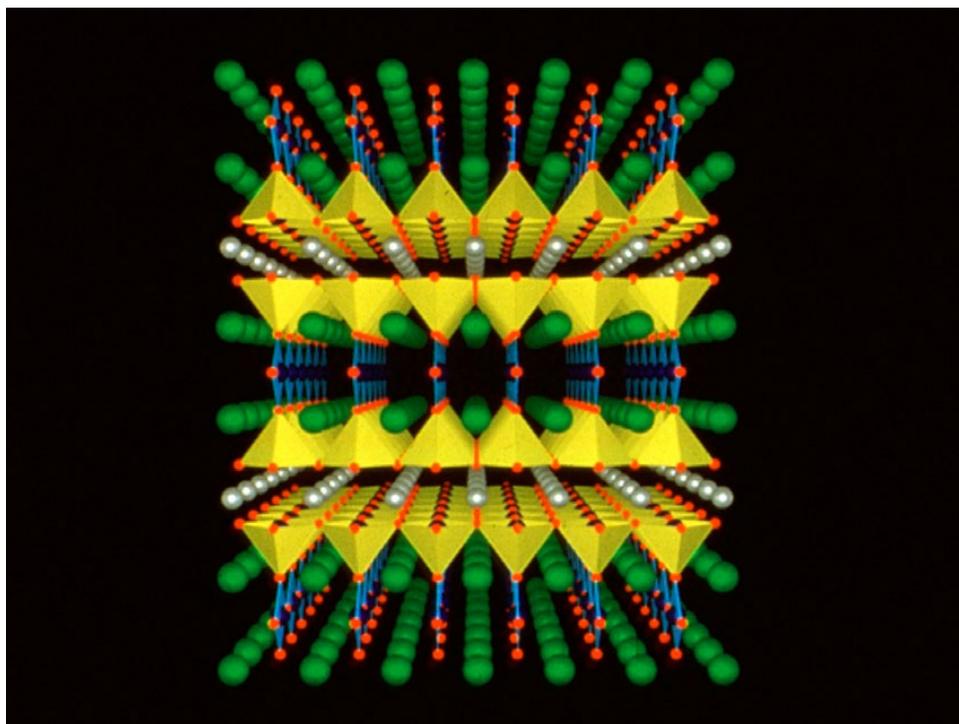
ont reçu le prix Nobel de physique en 1987 pour leur découverte de la supraconductivité de matériaux céramiques.

(*) Selon la théorie BCS Bardeen, Cooper, Schrieffer, la circulation du courant électrique s'effectue par un mouvement d'ensemble des électrons appariés, sans dissipation d'énergie, donc sans résistance électrique.



▲ Johannes Georg Bednorz (à gauche) et Karl Alexander Müller, ici au laboratoire IBM de Zurich, en Suisse, ont découvert en 1986 de nouveaux matériaux qui deviennent supraconducteurs au-delà de la température considérée limite.

► *Modélisation informatique de la structure d'un oxyde de cuivre, de baryum et d'yttrium (Y-Ba-Cu-O), un matériau supraconducteur à haute température.*



●●● alliages métalliques, la supraconductivité met en jeu les électrons. Ici, ce sont des trous, c'est-à-dire des lacunes en électrons qui se comportent comme des porteurs de charge positive. En particulier, ces trous ont accès aux mêmes états d'énergie que des électrons. La densité de ces états au voisinage de l'énergie de Fermi (*) joue un rôle important dans la détermination de la température critique. B. Reihl et ses collaborateurs ont mesuré cette densité, par une expérience de photoémission, dans le cas du composé $Sr_{0,2}La_{1,8}CuO_4$. La valeur de cette densité n'est pas très élevée – environ deux états par électron-volt et par cellule unitaire. Sa forme et sa valeur mesurées sont en accord avec un calcul théorique réalisé par L. F. Mattheiss, des laboratoires ATT-Bell.

Existe-t-il une bande interdite (*) dans le spectre en énergie de ces supraconducteurs ? Il y a plusieurs façons de mettre en évidence cette bande interdite et d'en mesurer la largeur. L'une d'elles consiste à étudier comment le supraconducteur transmet ou réfléchit un rayonnement infrarouge, en fonction de la fréquence de ce rayonnement. Les expériences de transmission dans l'infrarouge lointain, réalisées sur les composés au lanthane par Z. Schlesinger et ses collaborateurs, montrent

que cette bande interdite existe et présente une anisotropie due à la structure en feuillets de ces composés. La bande interdite mesurée dans la direction perpendiculaire à ces feuillets est plus petite que celle mesurée dans la direction parallèle. Des résultats confirmés dans une certaine mesure par des expériences d'effet tunnel (*).

Autre caractéristique fondamentale des supraconducteurs à haute température critique, les porteurs trous sont bien regroupés par paires, comme c'est le cas dans les supraconducteurs ordinaires. Les premiers à mettre en évidence l'appariement des porteurs de charge

(*) **L'énergie de Fermi** est l'énergie de l'état occupé de plus haute énergie dans un système de fermions (comme des électrons).

(*) **Une bande interdite** est une zone ne comportant aucun niveau d'énergie des électrons (ou des trous).

(*) **L'effet tunnel** est un phénomène quantique par lequel une particule franchit une barrière d'énergie qui serait insurmontable en physique classique.

Et depuis ●●●

2006

Une équipe japonaise de l'Institut de technologie de Tokyo découvre une nouvelle famille de supraconducteurs haute température à base de fer et de lanthane.

dans les nouveaux supraconducteurs ont vraisemblablement été D. Estève et ses collaborateurs, du Centre d'études nucléaires de Saclay, avec des physiciens de l'université d'Orsay (6).

Mais quel est le mécanisme qui explique la formation de ces paires? Autrement dit, quelle est la nature et l'intensité de l'interaction entre deux porteurs de même charge? Dans le modèle classique de BCS, il s'agit d'une interaction indirecte via le réseau cristallin sous-jacent. Ce modèle reste une interprétation possible avec le même couplage électron-phonon (*) ou bien avec des couplages différents. Mais, en outre, un large éventail de mécanismes, plus ou moins éloignés de celui décrit par BCS, ont été proposés par les théoriciens et font appel à la formation de polarons, de plasmons, d'excitons, de solitons, à un mécanisme de superéchange, ou encore à une interaction directe entre les électrons. Par contraste avec les expérimentateurs qui sont en général d'accord lorsqu'ils mesurent les mêmes choses dans les mêmes échantillons, on voit que l'éventail des modèles proposés aujourd'hui par les théoriciens est assez large.

En fait, comme l'a souligné J. Bardeen lors d'un congrès à Berkeley, en juin 1987, il est dangereux de comparer directement un résultat expérimental avec les prédictions d'un modèle théorique. Il faut plutôt suivre une démarche consistant d'abord à déduire des expériences un ensemble cohérent des paramètres de la supraconductivité à haute température. Cela signifie qu'entre les expériences d'une part et les modèles théoriques d'autre part, il existe un certain nombre de données qui apparaissent différentes de celles rencontrées dans les supraconducteurs habituels et il faut commencer par rassembler toutes ces données en un tableau cohérent.

(*) **Les phonons** sont les quantités élémentaires de vibration du réseau.

(*) **La longueur de cohérence** est la distance moyenne entre deux électrons appariés. Pour un supraconducteur ordinaire, elle est de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de nanomètres.

À cet égard, les supraconducteurs à haute température critique présentent un certain nombre de caractéristiques très différentes des supraconducteurs ordinaires. Ainsi, la largeur de leur bande interdite était toujours très petite devant l'énergie de Fermi, c'est-à-dire qu'une faible proportion des électrons était appariée. Autre différence importante, reliée directement à la précédente, la longueur de cohérence (*) est plus petite que dans les supraconducteurs ordinaires. Elle est de l'ordre de la dizaine d'ångströms, soit comparable aux dimensions caractéristiques du réseau lui-même. C'est là encore une situation nouvelle puisqu'on ne connaissait jusque-là que des supraconducteurs où les longueurs de cohérence sont très grandes, avec une transition BCS. C'est comme un nouveau jeu où les cartes ont été distribuées, et il ne faut pas continuer à raisonner avec les cartes d'avant.

FACILES À FABRIQUER

D'autres caractéristiques sont encore à préciser, comme la concentration des porteurs. Selon les expériences, celle-ci varie actuellement entre 2 et 8×10^{21} par centimètre cube. Il appartient maintenant aux expérimentateurs de donner des chiffres plus précis. Encore une fois, ce qui est important aujourd'hui, c'est d'arriver à dégager un tableau clair et surtout cohérent des principaux paramètres caractéristiques de la supraconductivité à haute température critique. Ce n'est qu'à cette condition qu'on arrivera à départager les différents modèles théoriques en lice. Cette compréhension du phénomène est essentielle pour déterminer jusqu'où on peut espérer monter en température critique et dans quelle direction chercher. En conclusion, il faut souligner l'intérêt exceptionnel de cette nouvelle classe de supraconducteurs. Ils sont faciles à fabriquer, possèdent des températures ainsi que des champs et des courants critiques élevés. Ce qui leur confère une grande importance technologique possible. En outre, la compréhension de la supraconductivité dans ces matériaux, sous tous ses aspects, est d'un intérêt théorique considérable. ■

(1) S. Uchida *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26, 1 151, 1987.

(2) R. J. Cava *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 408, 1987.

(3) H. P. R. Frederikse *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 16, 579, 1966.

(4) C. W. Chu *et al.*, *Science*, 235, 567, 1987.

(5) C. W. Chu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 405, 1987.

(6) D. Esteve *et al.*, *Europhys. Lett.*, 3, 1237, 1987.

2015

Une équipe de l'Institut Max-Planck pour la chimie, à Mayence, en Allemagne, montre que le sulfure d'hydrogène sous haute pression (150 gigapascals) est supraconducteur à 203 kelvins (-70 °C).

2019

Une équipe américaine de l'université George-Washington repousse la supraconductivité jusqu'à 260 kelvins (-13 °C) avec le décahydride de lanthane comprimé à 190 gigapascals.

ENTRETIEN AVEC **ALBERT FERT**

ET L'ÉLECTRONIQUE DEVINT GRAND PUBLIC

La capacité des disques durs fait un bond en avant dans les années 1990 grâce à la magnétorésistance géante. Un phénomène dont la découverte vaut le prix Nobel de physique en 2007 au Français Albert Fert:

Propos recueillis par **Jacques-Olivier Baruch**

La Recherche Dans les années 1990, l'électronique de spin, ou spintronique, que vous avez lancée s'est répandue aussi bien dans les laboratoires que dans les applications industrielles. D'où vient l'idée?

Albert Fert Alors que l'électronique exploite la charge de l'électron, la spintronique s'appuie sur une autre caractéristique de ces particules, leur spin. Celui-ci pourrait se décrire comme une aiguille de boussole ayant deux orientations possibles – haut et bas – et associée à la rotation de la particule sur elle-même. Ce domaine de la physique a émergé avec la découverte en 1988 d'un phénomène nouveau: la magnétorésistance géante ou GMR. Nous avons montré que la résistance électrique d'un matériau formé d'empilement de couches ultra-minces de fer et de chrome diminue considérablement quand il est placé dans un champ magnétique. Quand deux couches de fer ont des aimantations opposées, l'une arrête presque totalement les électrons de spin haut, l'autre ceux de spin bas. La résistance électrique du matériau est alors très grande. Or un faible champ magnétique permet d'aligner les aimantations, ce qui fait chuter la résistance du matériau. Ainsi la mesure de la résistivité d'un matériau multicouche permet de détecter un faible champ magnétique. C'est très utile pour la lecture d'enregistrements magnétiques.

Qu'est-ce que la GMR a changé ?

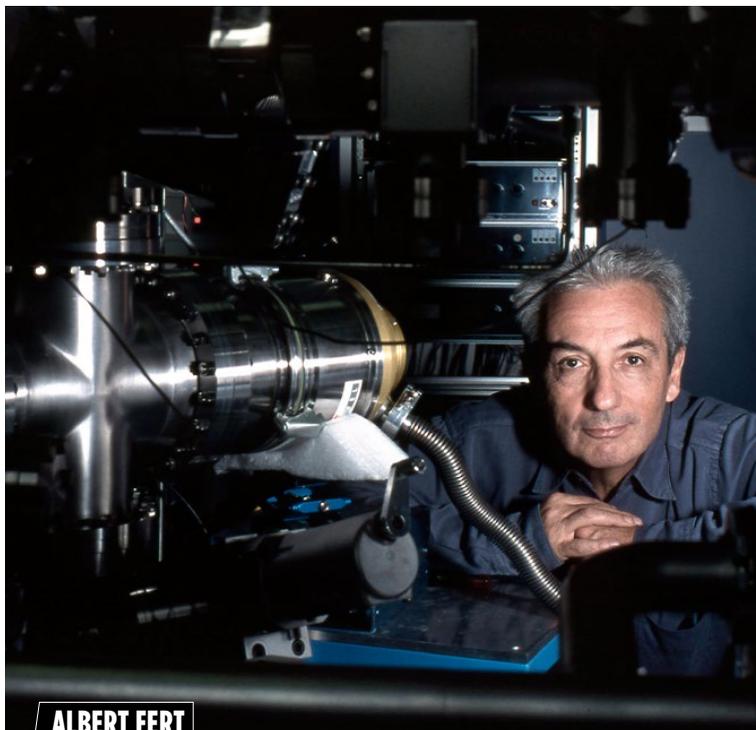
Au niveau fondamental, elle a relancé le domaine du magnétisme. Elle a ouvert la voie à

la spintronique qui, après avoir révélé d'autres phénomènes également liés au spin, connaît aujourd'hui un développement rapide dans de nombreuses directions. Mais ce sont ses applications que tout le monde retient. L'augmentation de capacité des disques durs, l'extension des technologies de l'ordinateur à l'électronique nomade, l'utilisation des capteurs de toutes sortes dans l'automobile ou l'électroménager, tout cela provient de la découverte de la spintronique.

Comment s'est déroulé le passage de la découverte aux applications ?

Il a été extrêmement rapide. Alors qu'il faut d'habitude une dizaine d'années pour voir émerger des applications, l'utilisation de la GMR dans des capteurs pour l'industrie automobile date de 1993, seulement cinq ans après notre premier article de recherche fondamentale. Les têtes de lecture GMR pour disques durs sont apparues en 1997. En Europe, Siemens en Allemagne, Philips aux Pays-Bas et Thomson-CSF en France ont travaillé dans le domaine dès la fin des années 1980. Siemens a bien tiré son épingle du jeu sur le marché des capteurs. Philips a voulu utiliser la GMR pour la lecture de microcassettes numériques, mais le CD a gagné la bataille contre les microcassettes. Thomson-CSF, avec qui je travaillais, est devenu Thales. L'entreprise utilise aujourd'hui nos résultats de recherche et cofinance avec le CNRS nos activités. Pour les disques durs, ce sont des compagnies américaines et asiatiques qui ont pris le gros du marché.





ALBERT FERT

1938 Il naît à Carcassonne.

1970 Il obtient son doctorat en physique à l'université Paris-Sud.

DE 1970 À 1995 Il effectue ses recherches au laboratoire de

physique des solides de l'université Paris-Sud.

2007 Il reçoit, avec le physicien allemand Peter Grünberg, le prix Nobel de physique.

têtes de lecture utilisera la GMR mais dans une géométrie nouvelle où le courant est perpendiculaire aux couches. La TMR sert aussi à fabriquer des mémoires vives magnétiques qui ne perdent pas l'information quand l'ordinateur est éteint. Airbus les a adoptées pour l'électronique de bord de ses avions, car elles ne sont pas sensibles au rayonnement reçu en haute altitude. Elles ont aussi des applications dans le spatial. Un domaine de recherche très actif est la spintronique avec semi-conducteurs, qui vise à combiner l'électronique classique et la spintronique. On attend aussi beaucoup de la technique du transfert de spin, qui permet le transport d'aimantation par un courant. La prochaine génération de mémoires vives magnétiques utilisera l'écriture par transfert de spin et devrait avoir un impact important dans la technologie des ordinateurs, en particulier pour la réduction de leur consommation d'énergie. La manipulation de l'aimantation par transfert de spin permet aussi de générer des oscillations radiofréquence avec des applications prometteuses en télécommunications. À plus long terme, on attend beaucoup de l'utilisation des matériaux carbonés comme le graphène, mais aussi de la nanospintronique à un électron, une des voies possibles pour le calcul quantique.

Aujourd'hui, les nanotechnologies sont au cœur des sujets de société. Comment jugez-vous cette évolution ?

Les nanotechnologies sont des outils, par exemple des microscopes ou des graveurs de lignes très fines, qui permettent de voir ou d'organiser la matière à l'échelle du nanomètre, une échelle à laquelle apparaissent des phénomènes physiques nouveaux. Ces technologies ont été fondamentales pour nos travaux, et d'autres. Les biologistes profitent, par exemple, des progrès de la microscopie à effet tunnel et aussi de la nanofluidique, qui leur permet de piloter l'écoulement de fluides biologiques dans des nanocanaux. Il est vrai que certaines nanotechnologies créent des réticences. Des nanoparticules peuvent être toxiques. Leur utilisation dans des produits cosmétiques, comme des crèmes anti-UV, ou des produits agroalimentaires doit être réglementée, comme c'est le cas chaque fois qu'une nouvelle technologie apparaît. Mais il ne faut pas tout mettre dans le même panier. Ces nanoparticules ne concernent qu'une toute petite partie des nanotechnologies. Il n'y a aucune nanoparticule, ni en nanoélectronique ni en spintronique. ■

Quels ont été les facteurs déclenchants de votre découverte ?

C'est la rencontre entre les progrès de la recherche fondamentale sur l'influence du spin dans la conduction électrique et l'arrivée des premières nanotechnologies dans les années 1980. Celles-ci permettent de voir ou de structurer la matière à l'échelle du nanomètre, le millionième de millimètre. C'est la version moderne du microscope binoculaire et du fer à souder. Elles ont permis à beaucoup de sciences de progresser. Sans les technologies de dépôt de couches de seulement quelques nanomètres d'épaisseur, nous n'aurions pas pu découvrir la GMR.

Où en est-on des prolongements de la GMR ?

La magnétorésistance de jonctions tunnel (TMR) a déjà des applications. Dans les dispositifs TMR, les électrons traversent une fine couche isolante par un effet quantique appelé effet tunnel. La première observation date de 1975, mais la technologie ne permettait pas d'obtenir des résultats reproductibles. C'est en 1995 que la TMR a été relancée par une équipe du MIT. Elle est appliquée à la lecture des disques durs depuis quelques années. La prochaine génération de

ENTRETIEN AVEC **TAKAAKI KAJITA**

LES NEUTRINOS ONT BIEN UNE MASSE

En observant que les neutrinos oscillent entre plusieurs états, Takaaki Kajita, Prix Nobel de physique en 2015, prouve que ces particules élémentaires, très difficiles à détecter, ont bien une masse.

Propos recueillis par **Sylvain Guilbaud**

La Recherche Que sont les neutrinos et pourquoi sont-ils si fascinants ?

Takaaki Kajita Les neutrinos sont des particules élémentaires, comme les quarks ou les électrons. À la différence de ces derniers, ils ne possèdent pas de charge électrique et interagissent très peu avec la matière. Pour cette raison, ils nous traversent très facilement, ainsi que la Terre, sans produire le moindre effet. Nous connaissons trois familles de neutrinos : les neutrinos électroniques, muoniques et tauiques. En physique, nous appelons ces familles des « saveurs ». Ces particules sont produites en des endroits divers de l'Univers : dans l'atmosphère terrestre, au centre du Soleil ou dans des endroits plus éloignés de l'Univers. Les neutrinos atmosphériques, que j'ai étudiés en particulier, sont produits lorsque des rayons cosmiques venus de l'espace rencontrent des noyaux d'atomes dans l'atmosphère terrestre. Cela produit de nouvelles particules, qui se désintègrent successivement en cascade, donnant notamment des neutrinos. Le modèle standard, qui explique comment agissent les particules et décrit les interactions fondamentales (*) qui les relie, est très efficace, mais il prédit que les neutrinos n'ont pas de masse. Or nous avons constaté expérimentalement qu'ils en ont bien une ! Cependant, cette masse est si petite (on ne sait pas encore bien l'estimer) que cela fait des neutrinos des particules très différentes des quarks par exemple. Pourquoi sont-ils si spéciaux ? Je ne sais pas, mais

il doit bien y avoir une raison. C'est pourquoi il y a encore du travail à réaliser sur les neutrinos. Je crois que cela peut être la clé pour comprendre la physique à la plus petite échelle.

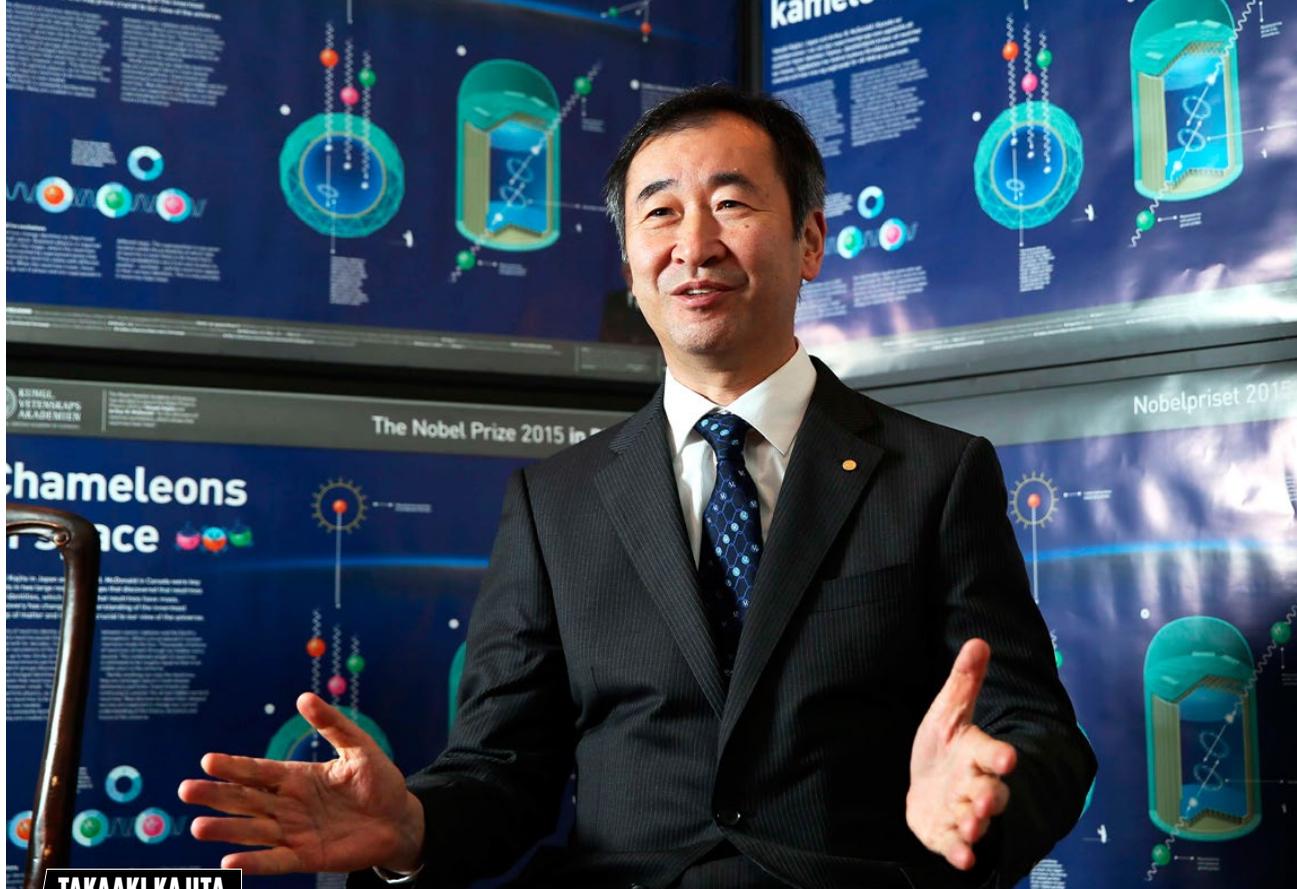
Pourquoi avez-vous choisi de vous pencher sur ces questions ?

Quand j'étais jeune, j'ai été très attiré par la façon dont la physique tentait d'appréhender le monde : partir de principes de base, faire des expériences et essayer d'en tirer des conclusions sur l'Univers. Dans les années 1970, alors que j'étais étudiant, les physiciens théoriciens tentaient d'unifier les interactions électromagnétiques, faible et forte. Leur théorie prédisait que les protons et les neutrons devaient se désintégrer après des temps de vie de l'ordre de 10^{28} à 10^{32} années. Ce sont des durées considérables (des milliards et des milliards de fois l'âge de l'Univers), mais en observant de très grandes quantités de ces particules, il devrait être possible de mesurer quelques désintégrations par an. C'était l'objectif de l'expérience japonaise Kamiokande, que j'ai rejointe pour effectuer ma thèse de doctorat sous la direction de Masatoshi Koshiba (Prix Nobel de physique 2002).

Quel est le lien avec les neutrinos ?

Nous cherchions à mesurer de très rares désintégrations de protons. Il fallait donc s'affranchir de tous les autres signaux pour ne pas être parasités. Ainsi, le détecteur a été construit à Kamioka, entre Tokyo et Osaka, sous une montagne, pour arrêter au maximum les particules





TAKAASI KAJITA

1959 Il naît à Higashimatsuyama, au Japon.

1986 Il soutient sa thèse sur la recherche de la désintégration des nucléons dans le cadre de l'expérience Kamiokande.

1988 Il est nommé chercheur assistant

à l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques (ICRR) de l'université de Tokyo. Il travaille à la conception de l'expérience Super-Kamiokande.

1998 Il démontre l'oscillation des neutrinos.

2008 Il est nommé directeur de l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques.
2015 Il reçoit le prix Nobel de physique avec l'Américain Arthur McDonald pour la mise en évidence de l'oscillation des neutrinos.

en provenance de l'atmosphère, comme les muons. En revanche, les neutrinos ne sont pas entravés par cet obstacle. Ils peuvent arriver au niveau du détecteur et créer des signaux. Pour éliminer ce signal d'arrière-plan à la désintégration des protons, il fallait donc être capable de mesurer précisément ces neutrinos atmosphériques. Ces particules ont dès lors commencé à susciter beaucoup d'intérêt, alors qu'elles avaient été détectées quinze ans plus tôt.

À quoi ressemblait l'expérience Kamiokande ?

Imaginez un immense réservoir de 16 mètres sur 16 m placé dans une caverne que nous avons creusée sous la montagne. Ce réservoir a été rempli progressivement de 3 000 m³ d'eau. Perchés sur des bateaux pneumatiques, nous tapissons la totalité des murs du réservoir de tubes photomultiplicateurs destinés à capter de très faibles flashes lumineux. Ils permettaient de détecter indirectement une éventuelle désintégration de proton et les neutrinos : de temps en

temps, un neutrino interagit avec l'eau en transférant son énergie à un lepton chargé (*), lequel se déplace alors plus vite que la lumière dans l'eau et émet des photons. C'est l'effet Cherenkov. Avec nos casques, nous ne ressemblions pas à l'image que les gens se font des scientifiques. Mais c'est une part importante du travail des physiciens expérimentateurs que de construire des détecteurs. Nous étions seulement une dizaine de personnes. Cela m'a beaucoup plu. Une fois la construction de Kamiokande achevée, la prise de données a pu commencer.

Avez-vous observé des désintégrations de protons ?

Non ! Nous n'avons rien vu de ce côté. Mais après avoir terminé ma thèse, je me suis replongé dans le logiciel qui analysait les données de l'expérience Kamiokande dans le but de l'améliorer, en particulier pour être capable de différencier le flash lumineux provenant d'un neutrino muonique de celui provoqué par un neutrino électronique. J'ai d'abord testé les changements ●●

(*) Les interactions fondamentales sont les quatre forces qui régissent l'Univers. Ce sont les interactions forte et faible, qui sont les deux forces nucléaires, l'interaction électromagnétique, qui décrit notamment la lumière, et la gravité, la seule force qui n'est pas décrite par le modèle standard.

(*) Les leptons chargés sont des particules élémentaires qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte et qui possèdent une charge électrique, par exemple l'électron.

••• que j'avais effectués en mesurant un phénomène connu, à savoir la fréquence de détection de chacune de ces deux saveurs de neutrinos. Lorsqu'un rayon cosmique provoque la création de neutrinos dans l'atmosphère, il y a deux neutrinos muoniques créés pour un neutrino électronique. Je m'attendais donc à observer plus de neutrinos muoniques, mais ce n'était pas le cas ! Il y avait un déficit dans le nombre de neutrinos muoniques.

Quelle a été votre réaction ?

Je me suis dit que j'avais fait une erreur quelque part, en modifiant le logiciel d'analyse des données. Pendant un an, j'ai cherché cette erreur. Mais il n'y en avait pas. Nous avons donc publié un article expliquant que nous observions un déficit de neutrinos muoniques. Nous y concluons qu'une explication possible était « l'oscillation » des neutrinos (1).

De quoi s'agit-il ?

C'était une hypothèse théorique formulée au début des années 1960 notamment par le physicien italien Bruno Pontecorvo et les physiciens japonais Ziro Maki, Masami Nakagawa et Shoichi Sakata (2). Selon cette hypothèse, les neutrinos changent de saveur au fur et à mesure

une expérience similaire mais vingt fois plus grande : Super-Kamiokande. Avec 50 000 m³ dans une caverne de plus de 30 mètres sur 30, nous pouvions détecter 10 neutrinos par jour. Une des difficultés fut de s'assurer de la pureté de l'eau. Si elle n'était pas parfaitement transparente, les flashes lumineux risquaient de trop s'atténuer avant d'être captés. Le principe, pour prouver l'oscillation des neutrinos, repose sur le fait que les neutrinos qui sont créés dans la couche d'atmosphère située au-dessus de Super-Kamiokande n'ont pas le temps de changer de saveur pendant la dizaine de kilomètres de trajet jusqu'au détecteur, tandis que les neutrinos créés aux antipodes, et qui traversent sans problème l'intérieur de la Terre, parcourent plus de 10 000 kilomètres et ont le temps de se transformer. Ainsi, si l'oscillation existe bel et bien, nous nous attendions à observer un déficit de neutrinos muoniques pour les neutrinos arrivant « par en dessous », mais pas pour ceux arrivant « par au-dessus ». Il est possible de connaître le sens d'arrivée des neutrinos, car les flashes lumineux sont émis dans le même sens que leur sens d'arrivée. La construction de Super-Kamiokande a duré cinq ans. Nous avons commencé les mesures en 1996. En 1998, les résultats étaient là : l'oscillation des neutrinos était un phénomène bien réel (3).

Comment vit-on une telle découverte ?

J'étais vraiment excité de voir ce phénomène se matérialiser. Ce résultat a aussi été trouvé par Arthur McDonald [colauréat du prix Nobel de physique 2015, NDLR] et son équipe avec l'expérience SNO [Sudbury Neutrino Observatory, NDLR], qui détectait, elle, des neutrinos en provenance du Soleil (4). Surtout, le fait que les neutrinos oscillent entre les différentes saveurs implique qu'ils ont une masse.

Quel est le lien entre la masse des neutrinos et le fait qu'ils oscillent ?

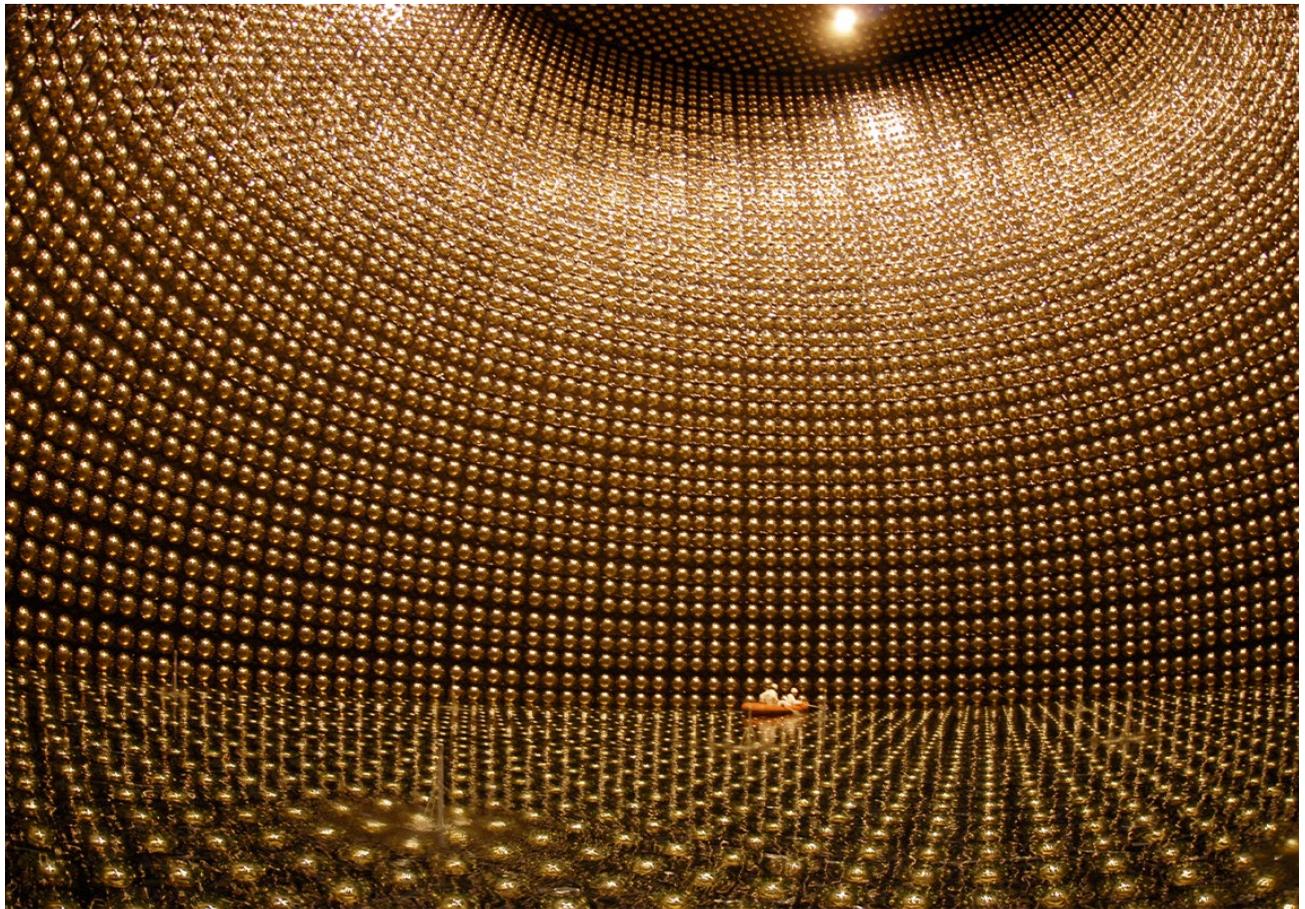
Pour le dire de façon simplifiée, si les neutrinos n'avaient pas de masse, ils se déplaceraient à la vitesse de la lumière, comme les photons par exemple. Or des particules qui se déplacent à la vitesse de la lumière ne voient littéralement pas le temps passer. Elles sont immuables. Mais si les particules ont une masse, alors elles se déplacent moins vite que la lumière et cela rend possible des changements, comme des oscillations par exemple. Les neutrinos changent, donc ils ont une masse. Mais celle-ci est

« Dans l'Univers, les neutrinos expliqueront peut-être pourquoi la matière domine l'antimatière »

qu'ils se déplacent, puis reprennent leur saveur d'origine, etc. Ainsi, un neutrino muonique produit dans l'atmosphère pourrait se transformer en neutrino tauique. Cela pouvait expliquer pourquoi nous observions moins de neutrinos muoniques que prévu.

Vous avez donc tenté de confirmer ce changement de saveur des neutrinos avec Kamiokande ?

Nous avons essayé. Mais il s'est révélé que Kamiokande n'était pas adaptée pour cela. Nous n'observions qu'une centaine de neutrinos atmosphériques par an. C'était trop peu pour prouver l'oscillation des neutrinos. Il nous fallait un détecteur plus grand, avec plus d'eau pour espérer capter plus de ces particules. Nous avons donc remis nos casques pour construire



minuscule : dix milliards de fois plus faible que la masse des quarks ou des électrons. En fait, il existe trois états de masse différents (bien que très proches) pour les neutrinos. Mais ces trois états de masse ne coïncident pas avec les trois saveurs (électronique, muonique ou tauique). Cela signifie qu'un neutrino électronique, par exemple, ne correspond pas à une masse particulière. On dit qu'il se trouve dans une superposition quantique des trois différents états de masse. C'est un mélange dont nous cherchons à mieux connaître tous les paramètres. Il ne faut pas oublier que le modèle standard n'explique pas la masse des neutrinos.

Y a-t-il des pistes pour expliquer pourquoi la masse des neutrinos est si faible ?

Oui. La principale hypothèse est le mécanisme de la balançoire (*seesaw mechanism*, en anglais). Selon cette dernière, il existerait un ou plusieurs neutrinos très lourds, qui expliqueraient, par symétrie, l'existence des neutrinos très légers que l'on observe. Avec cette hypothèse, les neutrinos expliqueront peut-être pourquoi la matière domine l'antimatière dans l'Univers. C'est une des grandes énigmes de la physique aujourd'hui.

En quoi consiste l'énigme de la matière et de l'antimatière ?

L'antimatière ressemble beaucoup à la matière, à ceci près qu'elle possède une charge électrique opposée. Par exemple, un antiélectron possède les mêmes caractéristiques qu'un électron, mais il est chargé positivement. On l'appelle d'ailleurs aussi « positron ». Chaque particule de matière possède ainsi une jumelle d'antimatière. Lorsque les deux se rencontrent, elles s'annihilent sous forme d'énergie. Dans l'Univers actuel, nous n'observons quasiment pas d'antimatière. Or, d'après la théorie actuelle, le Big Bang a entraîné l'apparition d'autant d'antimatière que de matière. En toute logique, les deux auraient dû s'annihiler entièrement pour ne laisser derrière elles que de l'énergie. Pourtant, la matière a survécu. Il devait y avoir un déséquilibre, très faible, dès le départ. Pour donner une idée des proportions, les physiciens estiment que, pour un milliard d'antiprotons présents juste après le Big Bang, il y avait un milliard et un protons. Le milliard d'antiprotons se serait désintégré avec le milliard de protons, et un proton aurait survécu. Cette asymétrie permettrait de comprendre pourquoi la matière ●●●

▲ L'équipe de Takaaki Kajita a mis au point, au Japon, une expérience titanesque nommée Super-Kamiokande. Les chercheurs, évoluant sur des bateaux, ont tapissé de tubes photomultiplicateurs les murs d'un réservoir d'eau de 50 000 m³, afin de capter des flashes lumineux provenant de neutrinos.

●●● domine dans l'Univers d'aujourd'hui. Mais quelle est l'origine de ce déséquilibre initial dans le nombre de particules ? S'il existait aussi des neutrinos lourds à l'époque, avec leurs jumeaux antineutrinos, une asymétrie dans leur désintégration aurait pu donner un avantage à la matière.

Quelles sont aujourd'hui les expériences menées sur les neutrinos ?

Il y en a beaucoup. Pour en citer seulement quelques-unes, il y a l'instrument IceCube au pôle Sud. C'est l'un des plus gros détecteurs de neutrinos en service à l'heure actuelle : il occupe un volume de 1 km³ sous la glace antarctique. Cet instrument a fait des mesures intéressantes, notamment en détectant des neutrinos cosmiques, qui proviennent de l'extérieur du Système solaire. Cette année, l'équipe d'IceCube a annoncé n'avoir pas détecté de neutrinos stériles (5), une quatrième famille de neutrinos imaginés par certains théoriciens pour expliquer notamment le déséquilibre matière-antimatière. Je ne suis pas surpris par ce « non-résultat », mais il ne signifie pas que les neutrinos stériles n'existent pas. Il faut continuer à les chercher. Une autre collaboration internationale sur les neutrinos se nomme T2K et utilise le détecteur Super-Kamiokande. L'objectif est d'observer l'éventuelle différence de comportement entre

les oscillations de neutrinos et d'antineutrinos, ce qui pourrait nous renseigner sur l'asymétrie entre matière et antimatière. Les résultats préliminaires présentés cette année sont encourageants. Enfin, d'autres grands projets sont encore en attente de financement, dont Hyper-Kamiokande, au Japon, qui pourrait être dix fois plus grand que Super-Kamiokande.

Vous vous intéressez désormais aux ondes gravitationnelles, pourquoi ?

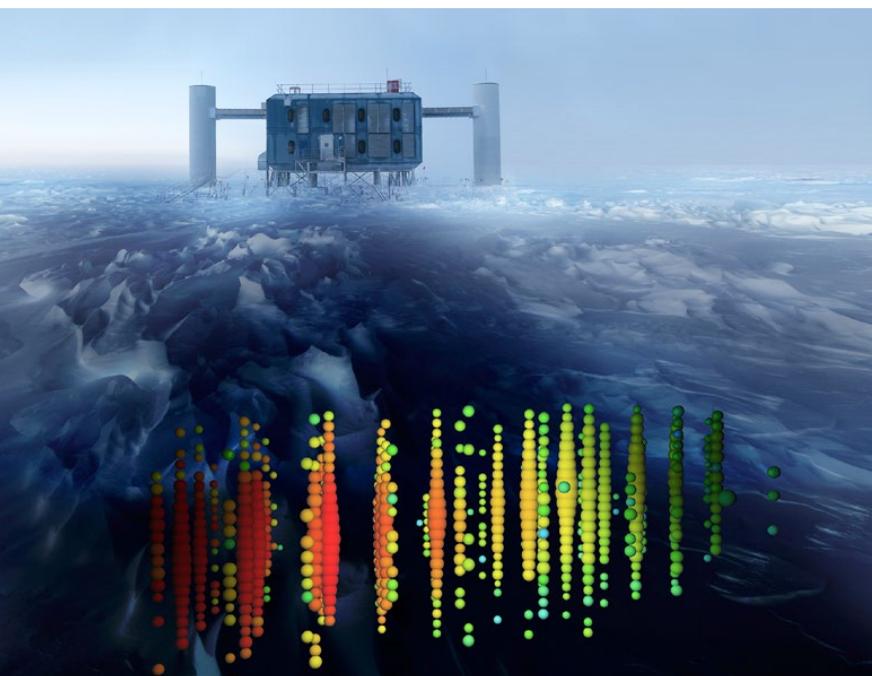
La première détection directe d'ondes gravitationnelles – des vibrations de l'espace-temps prédites par Albert Einstein – annoncée par la collaboration Ligo-Virgo cette année, est une grande découverte. À la manière des neutrinos cosmiques, les ondes gravitationnelles sont des signaux très intéressants pour nous aider à comprendre les phénomènes qui se produisent loin dans l'Univers, tels les trous noirs ou les supernovae. Il est clair que les ondes gravitationnelles sont la nouvelle fenêtre pour étudier l'Univers. Auparavant, nous n'utilisions que les ondes électromagnétiques, la lumière. Nous entrons dans l'ère de l'astronomie « multimessager ». Je suis maintenant le responsable de Kagra, un détecteur d'ondes gravitationnelles que nous sommes en train de construire au Japon. Dans deux ans, nous comptons commencer les réglages afin d'avoir une sensibilité suffisante pour détecter les signaux d'ondes gravitationnelles dans trois ou quatre ans. Le but sera de partager les données avec les détecteurs Ligo et Virgo afin d'avoir un véritable réseau d'observation.

Quel est le prochain grand mystère que vous aimeriez voir résoudre ?

Celui de la matière noire, qui compose plus de 25 % du contenu en énergie de l'Univers sans que l'on connaisse sa nature. Ce qui est sûr, c'est que ce n'est pas un élément du modèle standard et que les neutrinos n'en sont pas le constituant. Il y a encore d'autres mystères, et les jeunes physiciennes et physiciens que j'ai rencontrés cette année à Lindau [en Allemagne, où se réunissent chaque année Prix Nobel et jeunes chercheurs, NDLR] sont très enthousiastes. La passion pour la physique permet de surmonter bien des difficultés. ■

- (1) K. Hirata *et al.*, *Phys. Lett. B*, 205, 416, 1988.
- (2) Z. Maki *et al.*, *Prog. Theor. Phys.*, 28, 870, 1962.
- (3) Y. Fukuda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 1562, 1998.
- (4) Q. R. Ahmad *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 07301, 2001.
- (5) M. G. Aartsen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 071801, 2016.

▼ Au pôle Sud, IceCube (dont on distingue le laboratoire en haut) est l'un des plus gros détecteurs de neutrinos en service. Au premier plan, les premiers neutrinos de très haute énergie qu'il a détectés grâce à ses sondes plantées sous la glace (montage).



ABONNEZ-VOUS À La Recherche

et recevez **EN CADEAU** ces deux hors-série



Ce numéro spécial vous fait découvrir les controverses qui ont marqué, ou marquent encore, l'histoire des sciences. Certaines d'entre elles ont opposé des scientifiques à des institutions ou à des groupes sociaux. D'autres ont pris la forme de duels intellectuels entre hommes de sciences : Newton et Leibniz sur la paternité du calcul différentiel ; Pasteur et Pouchet sur la génération spontanée ; Kelvin et Darwin sur l'âge de la Terre.



Comment se construit la mémoire ? Comment fonctionne-t-elle ? Pourquoi oublie-t-on ? Notre mémoire n'est pas unique. Les neuropsychologues ont identifié différents systèmes qui la composent dont : la mémoire de travail, qui joue un rôle pivot dans l'encodage et la récupération des informations, la mémoire sémantique, qui recense nos connaissances sur nous-mêmes et sur le monde et la mémoire épisodique, qui nous fait revivre avec émotion les scènes de notre passé.

1 AN D'ABONNEMENT
(soit 10 n^{os} + 1 n^o double)

60€ au lieu de ~~71,90€~~*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à La Recherche et je reçois **EN CADEAU** les 2 hors-série : Les plus grandes controverses scientifiques + La mémoire

OFFRE CLASSIQUE 1 AN - 10 n^o + 1 n^o double pour **60€** au lieu de ~~71,90€~~*, soit plus de **10€ d'économie**.

OFFRE COUPLÉE 1 AN - 10 n^o + 1 n^o double + 4 hors-série pour **84€** au lieu de ~~99,50€~~*, soit plus de **15€ d'économie**.

MES COORDONNÉES

M. Mme Melle

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Tél. : _____

Ville : _____

Pour une meilleure gestion de votre abonnement, merci d'indiquer votre e-mail :

E-mail : _____ @ _____

J'accepte de recevoir par mail des informations de La Recherche et de ses partenaires.

MON MODE DE RÉGLEMENT

chèque bancaire à l'ordre de La Recherche carte bancaire

N° _____

Expire fin _____

Signature obligatoire

SOPHIA PUBLICATIONS - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : France : 01 55 56 71 15 - & Étranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

La Recherche

* Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros normaux au prix de 6€40, le numéro double au prix de 7€90 et les hors-série au prix de 6€90. Offre exclusivement réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine et valable jusqu'au 31/12/19 et dans la limite des stocks disponibles. Vous recevrez vos cadeaux sous 4 semaines maximum après l'enregistrement de votre abonnement. Conformément à la loi « Informatique et Libertés » du 06/01/78 (art 27) vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des informations vous concernant. Elles sont destinées exclusivement à SOPHIA PUBLICATIONS et à ses partenaires sauf opposition de votre part en cochant la case ci-après

PDR33/G01+81

LA TÉLÉPORTATION D'ATOMES, UNE PREMIÈRE!

L'idée de la téléportation quantique est née en 1992. Douze ans plus tard, deux physiciens la réalisent, en Autriche et aux États-Unis.

Nicolas Constans, journaliste

En 2004, pour la première fois, des physiciens téléportent des atomes : ils transfèrent à l'identique les caractéristiques de ceux-ci sur d'autres atomes, distants de 5 micromètres. Publiée

le 17 juin, la découverte est le fait, indépendamment, des groupes de Rainer Blatt, à l'université d'Innsbruck, en Autriche, et de David Wineland, à l'université de Boulder, dans le Colorado, aux États-Unis (1). Leur objectif n'est pas, comme l'imaginaient les auteurs de science-fiction, de transporter des objets, voire des êtres vivants, d'un point à un autre, mais d'explorer une toute nouvelle forme de télécommunication. La téléportation est en effet l'un des développements de l'information quantique, domaine de recherche imaginé à partir des années 1970. La tendance constante à la miniaturisation des composants électroniques avait poussé les physiciens à se demander si les bits informatiques, les « 0 » et les « 1 », pouvaient être stockés chacun sur un atome, ou sur une autre particule microscopique. Par exemple, le « 0 » peut correspondre à un état où un atome a une certaine énergie, et le « 1 » à un état où il en a une autre.

L'information quantique ne prend toutefois son véritable essor qu'en 1994, quand le mathématicien américain Peter Shor montre que certains calculs effectués sur ces bits atomiques, les « qubits », pourraient être beaucoup plus rapides qu'avec des ordinateurs classiques. À cette échelle, en effet, les particules obéissent aux lois très particulières de la mécanique quantique. Ainsi, elles se trouvent en général dans un état « indéterminé ». Par exemple, un atome est

dans un état qui résulte du mélange de plusieurs états : celui où son énergie a une certaine valeur, celui où elle en a une autre, etc. Autrement dit, les qubits ne sont pas « 0 » ou « 1 », mais en général un mélange de « 0 » et de « 1 ». Grâce à cette propriété, des opérations impossibles dans les ordinateurs classiques peuvent être effectuées sur les qubits, d'où l'efficacité des calculs. En outre, toute mesure d'un qubit le transforme irrémédiablement. Cela permet en particulier de détecter les tentatives d'espionnage d'une communication : c'est la cryptographie quantique. Pour faire communiquer entre eux les futurs ordinateurs quantiques, on a besoin de transmettre des qubits d'un point à un autre. Le plus simple serait de recopier ces derniers, mais les lois de la physique quantique l'interdisent. En 1992, une équipe internationale trouve un moyen de contourner ce problème : la téléportation quantique (2). L'état du qubit n'est pas recopié mais transféré, sans avoir été mesuré, depuis une particule de départ jusqu'à une particule d'arrivée.

INTRIQUER PUIS SÉPARER

La téléportation utilise pour cela une propriété de la mécanique quantique, l'intrication. Intriquer deux particules signifie les lier en un tout indissociable. Cette liaison persiste même si ces deux particules sont ensuite éloignées l'une de l'autre. L'intérêt de l'intrication est qu'elle mélange les états des qubits. À cause de cela, même si l'intrication est ensuite brisée, chaque particule garde la trace de ce mélange. Autrement dit, de l'information a été transférée entre les deux particules par ce biais.



Concrètement, la téléportation entre deux particules en nécessite une troisième, qui sert d'intermédiaire. Au départ, la particule cible de la téléportation et la particule intermédiaire sont intriquées. Puis cette dernière est placée au même endroit que celle qui va être téléportée. L'expérimentateur effectue alors une mesure bien particulière sur ces deux particules. Cela crée une intrication entre elles, tout en brisant celle qui existait entre la particule intermédiaire et la cible. Il ne reste plus qu'à effectuer, sur la particule cible, une manipulation simple déterminée par le résultat de la mesure pour que celle-ci se retrouve dans l'état du qubit initial.

Dès la publication du principe de la téléportation, des équipes entreprennent de la réaliser. En 1997, un groupe romain réussit la téléportation d'un photon, mais elle est imparfaite, car l'expérimentateur doit connaître à l'avance l'état du qubit à téléporter. La même année, un autre groupe, à Innsbruck, parvient à résoudre ce problème, toujours avec des photons, mais la téléportation ne se produit en moyenne qu'une fois sur quatre.

Et depuis ● ● ●

-
-
- **2017**
Des chercheurs chinois réalisent la première téléportation de l'état quantique d'un photon entre la station au sol de Ngari, au Tibet, et le satellite Mozi.
-
-
-
-
-

▼ *La téléportation quantique consiste à transférer à l'identique les caractéristiques d'un atome sur un autre (illustration).*

En 1995, deux théoriciens, l'Allemand Peter Zoller et l'Espagnol Ignacio Cirac, proposaient une manière de réaliser concrètement un composant élémentaire d'un ordinateur quantique, une porte logique, qui met en jeu des ions confinés dans des pièges électromagnétiques (3). Dans ce système, les états « 0 » ou « 1 » des qubits correspondent à différentes valeurs d'énergie de ces ions. L'intrication des ions étant nécessaire au fonctionnement de la porte, les théoriciens décrivent une façon de l'obtenir. Elle utilise la répulsion électrique entre les ions, contrôlée par laser.

LE DÉFI DES LONGUES DISTANCES

À partir du moment où il devient possible d'intriquer des ions, ils doivent pouvoir être téléportés. Associés dès le début aux réflexions des théoriciens, deux expérimentateurs spécialistes des ions piégés, David Wineland et Rainer Blatt, essaient de réaliser cette porte dans leurs laboratoires. En parallèle, ils tentent de téléporter des ions. « *La difficulté est qu'il faut à la fois confiner ces ions, car leur environnement risquerait de détruire les qubits qu'ils portent, mais aussi les faire interagir afin de les intriquer* », indique Nicolas Cerf, de l'École polytechnique de l'université libre de Bruxelles. Finalement, les deux groupes parviennent simultanément en 2004 à réaliser la première téléportation d'atomes. Contrairement aux téléportations de photons de 1997, elle est cette fois conforme au protocole de 1992.

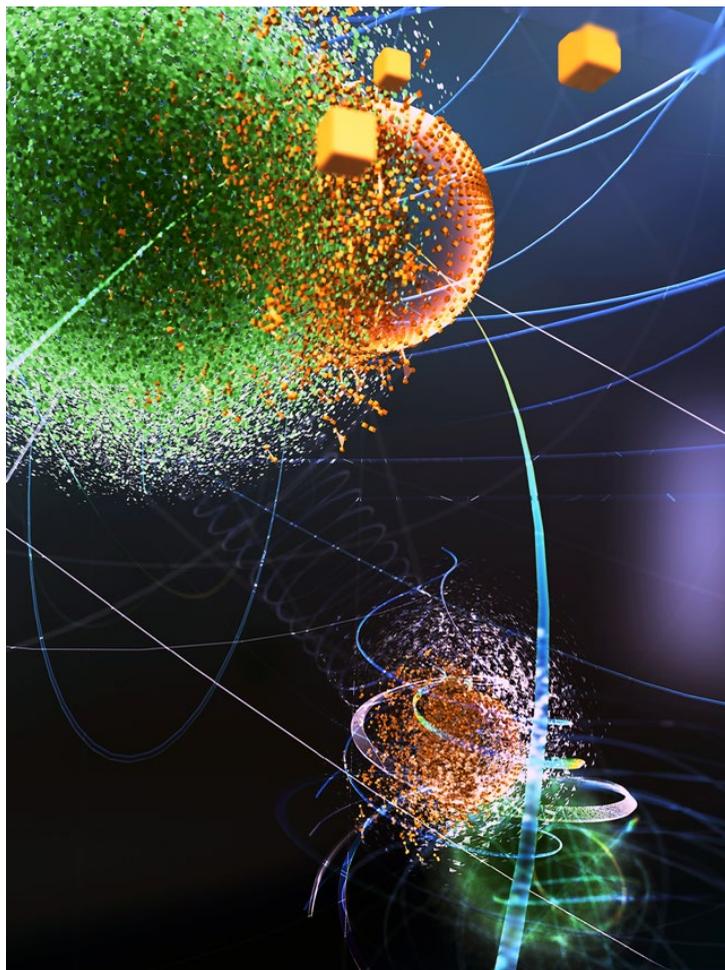
Une étape supplémentaire sera franchie en 2006, quand une équipe de l'Institut Niels-Bohr de Copenhague parvient à téléporter des qubits depuis des photons, jusqu'à des atomes (4). En effet, les physiciens cherchent aujourd'hui à réaliser des « téléphones quantiques », c'est-à-dire téléporter des qubits sur de très longues distances. Pour cela, ils ont besoin de dispositifs appelés répéteurs quantiques. Or ceux-ci utilisent à la fois des atomes et des photons, d'où l'importance de pouvoir téléporter des qubits de l'un à l'autre. « *Aujourd'hui, les ingrédients pour un répéteur quantique sont là*, indique Nicolas Cerf. *Il est plausible qu'il soit réalisé dans la décennie qui vient.* » ■

(1) M. D. Barrett *et al.*, *Nature*, 429, 737, 2004 ; M. Riebe *et al.*, *Nature*, 429, 734, 2004.

(2) C. H. Bennett *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 70, 1895, 1993.

(3) J. I. Cirac et P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 4091, 1995.

(4) J. F. Sherson *et al.*, *Nature*, 443, 557, 2006.



LE GRAPHÈNE, MATÉRIAU RÉVOLUTIONNAIRE

Pour remplacer le silicium, le meilleur candidat est un matériau que l'on trouve... dans les mines de crayon! Andre Geim et Konstantin Novoselov obtiendront le prix Nobel de physique en 2010 pour avoir isolé du graphène.

Franck Daninos, journaliste

« *Le graphène est le meilleur candidat qui ait jamais existé pour remplacer le silicium et permettre la miniaturisation extrême des transistors* », annonce Andre Geim, directeur du centre de physique mésoscopique et de nanotechnologies de l'université de Manchester, au Royaume-Uni. Et ce dernier sait de quoi il parle. C'est lui qui, en 2004, a montré qu'il était possible d'isoler du graphène, un cristal bidimensionnel dont l'épaisseur est celle d'un atome. Autrement dit, le plus fin qui soit.

En quatre ans, le graphène est devenu la star des nanotechnologies et de la physique de la matière condensée. Éclipsant les autres sujets de recherche dans ces deux domaines, il était la vedette du congrès annuel de la Société américaine de physique, qui s'est tenu au printemps 2008 à la Nouvelle-Orléans. Autre témoin, le nombre de publications scientifiques qui ne cesse d'augmenter. Ou encore ce classement réalisé par un panel du MIT, aux États-Unis, désignant les transistors en graphène comme l'une des dix technologies émergentes de l'année.

Des expériences réalisées en 2008 confirment que, sous certaines conditions, le graphène pourrait être utilisé pour fabriquer des transistors ultrarapides, larges d'une dizaine de nanomètres et épais de quelques dixièmes de nanomètre. Les techniques de fabrication du graphène sont, elles aussi, en plein développement. Soit autant d'éléments laissant espérer que le graphène tiendra une place de choix dans l'électronique de demain. Ce matériau n'avait, a priori, rien d'extraordinaire. Il s'agit d'une couche plane d'atomes de carbone,

constituée par la répétition de motifs hexagonaux où les atomes sont situés à chacun des six sommets. Cette structure cristalline rappelle ainsi la forme d'un nid-d'abeilles. À l'état naturel, on le trouve à l'intérieur des cristaux de graphite qui composent les mines de crayon (Fig. 1). Ce matériau est effectivement constitué d'un empilement régulier de feuilles de graphène, liées entre elles par des interactions dites de « Van der Waals ». Ces interactions sont de faible intensité. C'est la raison pour laquelle des feuilles de graphène peuvent glisser les unes sur les autres et se détacher, lorsqu'une mine de crayon gratte une feuille de papier.

CRISTAUX PELÉS... AU RUBAN ADHÉSIF

Les travaux visant à produire un nombre restreint de feuilles de graphène trouvent leur origine dans les années 1970. Plusieurs méthodes ont été développées, comme l'intercalation de molécules au sein d'un cristal de graphite, ou la croissance de couches de carbone à la surface de métaux. Dans les années 1990, une monocouche aurait été fabriquée par cette dernière méthode. Mais ses propriétés électroniques n'avaient pas été étudiées. Pour cela, il aurait fallu que le graphène soit isolé, voire faiblement lié à la surface métallique. Une telle situation n'était, en réalité, pas vraiment recherchée. Car des arguments théoriques indiquaient qu'un cristal bidimensionnel ne serait jamais assez stable pour être isolé. En 2001, Walter de Heer, de l'Institut de technologie de Géorgie, à Atlanta, lançait un programme de recherche visant à produire un tout petit nombre



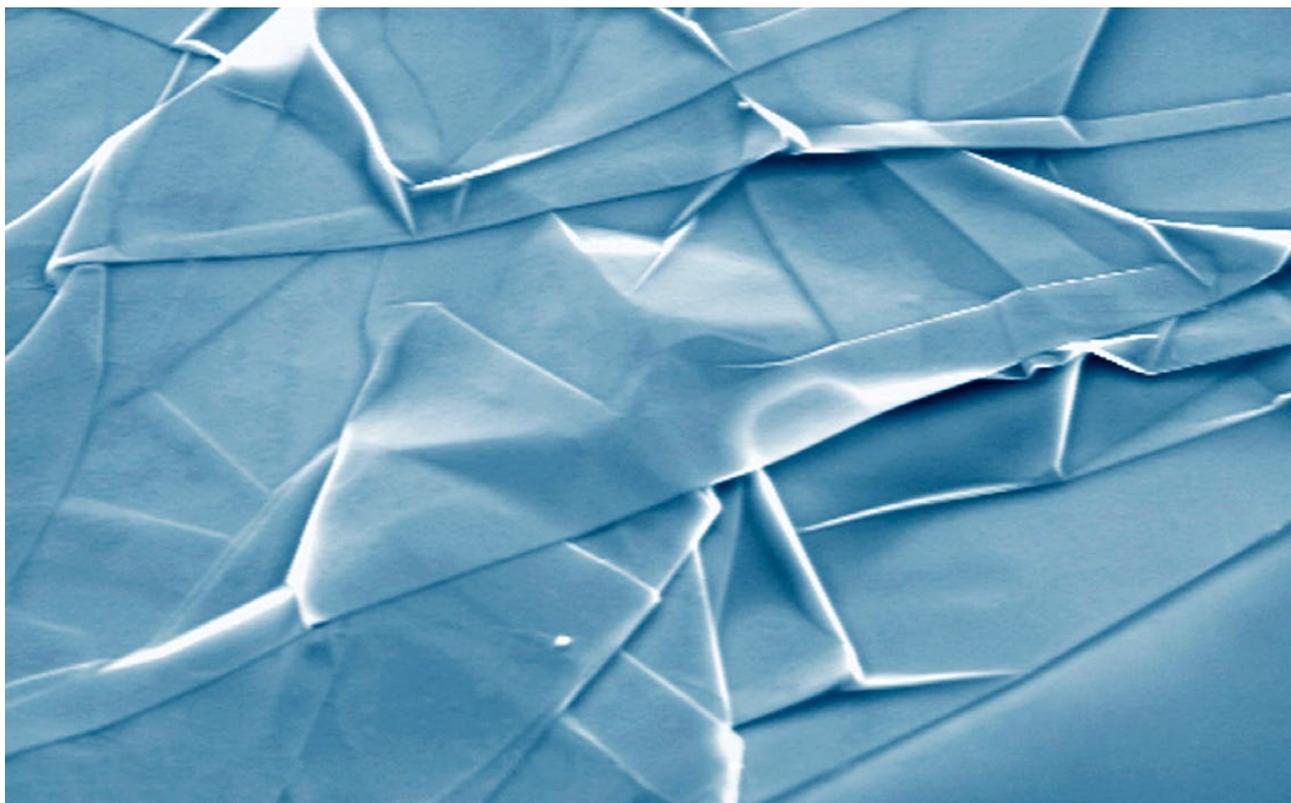
de feuilles de graphène superposées. Il souhaitait aussi en caractériser les propriétés électroniques, en vue d'éventuelles applications. Connue sous le nom de graphène « épitaxié », sa méthode de synthèse a permis d'isoler, en 2004, trois feuilles de graphène empilées. Par la suite, on a obtenu une monocouche grâce à cette méthode, qui est aujourd'hui considérée comme la seule capable de synthétiser du graphène à grande échelle. Mais, en 2004, quelques semaines avant que l'équipe américaine ne publie ses résultats (1), c'est Andre Geim qui a attiré l'attention médiatique (2).

À l'aide d'un simple ruban adhésif – de la marque Scotch, que l'on trouve dans tous les supermarchés! –, ce dernier a littéralement pelé des cristaux de graphite, feuille après feuille. Parmi les échantillons obtenus, un petit nombre n'était composé que d'une couche unique d'atomes de carbone très faiblement liés à leur support. « *J'ai vite compris que nous avions obtenu un nouveau type de matériau*, se souvient Andre Geim. *Mais, à l'époque, je ne pouvais imaginer qu'il serait à l'origine d'une physique si nouvelle, si riche, et à ce point prometteur en termes d'applications.* »

Dès 2005, en appliquant une tension électrique variable sur ce graphène, puis en mesurant la résistance du matériau, les physiciens de Manchester ont mis en évidence le comportement pour le moins inhabituel des électrons de conduction (3). Dans tous les matériaux connus, ceux-ci ressemblent à des boules de billard : leur comportement est modifié chaque fois qu'ils entrent en collision avec une impureté présente dans le réseau cristallin.

Dans le graphène, en revanche, la course des électrons demeure inchangée sur de très grandes distances (un micromètre environ) au regard de l'échelle atomique. Tout se passe, en fait, comme si ces électrons étaient dépourvus de masse. Ils se propagent ainsi à la vitesse de 1 000 kilomètres par seconde. Prédite, en 1947, d'une façon rigoureusement théorique par le Canadien Philip Wallace, cette propriété résulte du comportement collectif des électrons, et de leur interaction avec la structure cristalline et bidimensionnelle du graphène. Avec d'autres qui ont suivi, ces expériences ont prouvé qu'une feuille de graphène avait bel et bien été isolée. Et qu'Andre Geim n'avait ●●

▼ Une feuille de graphène est constituée d'une couche d'atomes de carbone. C'est un matériau à la fois très solide et très flexible.



... ni falsifié, ni extrapolé ses résultats de recherche, comme certains l'avaient un temps suggéré. Nombre de physiciens se sont alors plongés dans l'étude du graphène, avec pour objectif la caractérisation systématique de ses propriétés – électroniques, magnétiques, optiques, thermiques, mécaniques, etc. Et leurs travaux ont confirmé à quel point le graphène arborait des propriétés physiques incomparables. Mais c'est pour ses propriétés électroniques qu'il tient toujours le haut du pavé. En se fondant sur des mesures reliant la mobilité des électrons à la température, une équipe internationale de physiciens a calculé, en janvier 2008, que les électrons de conduction se déplaçaient plus aisément – sans être freinés par un obstacle – dans du graphène exfolié très pur que dans n'importe quel autre matériau utilisé dans l'électronique (4).

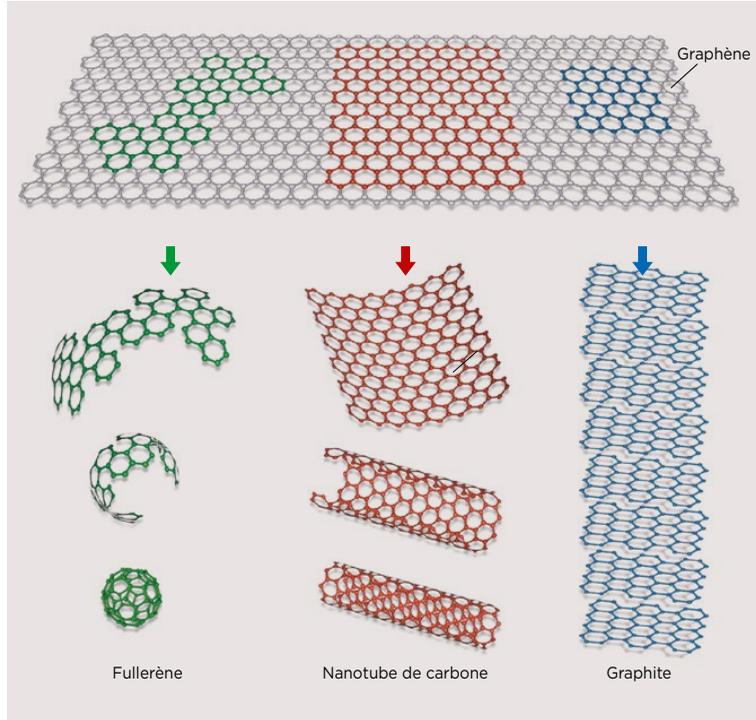
À température ambiante, la valeur de la mobilité électronique serait de 200 000 cm² par volt et par seconde. C'est cent trente fois plus que dans le silicium. Quelques mois plus tard, une autre équipe internationale confirmait, et même rehaussait, ces résultats (5). Par des techniques (indirectes) de mesure optique, elle a déterminé que la mobilité des électrons atteignait 250 000 cm² par volt et par seconde dans le graphène épitaxié, qui manifestement possède encore moins d'impuretés.

« La mobilité électronique est un paramètre clé dans l'industrie des semi-conducteurs », explique Claire Berger, du laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, qui a participé à ces dernières mesures. Plus la mobilité est importante, mieux les électrons peuvent se propager sans entrer en collision avec une impureté chimique ou un défaut cristallin. Or ces collisions libèrent de la chaleur, que les transistors au silicium doivent absolument évacuer pour fonctionner. Les plus fins mesurent actuellement 45 nanomètres. Mais, au-dessous d'une dizaine de nanomètres d'épaisseur, ces transistors deviendront trop petits pour que la chaleur soit évacuée. « En raison de la très grande mobilité des électrons dans le graphène, ceux-ci ne libèrent quasiment pas de chaleur », précise Claire Berger. Ce matériau permettrait donc de dépasser les limitations intrinsèques de l'électronique actuelle, pour conduire à une miniaturisation encore plus poussée des transistors. »

PLUS STABLE QUE LE SILICIUM

Un autre avantage du graphène est qu'il est beaucoup plus stable que le silicium. Dans le silicium, la propagation de grandes quantités de courant finit par entraîner un déplacement d'atomes. La structure cristalline se voit ainsi altérée, tout comme la conduction électronique. Ce phénomène est particulièrement saillant au niveau des contacts électriques, et d'autant plus important que ces contacts sont proches. Mais il ne se produit quasiment pas dans le graphène, en raison de la très grande stabilité chimique des liaisons entre atomes de carbone. Là encore, cette particularité faciliterait la miniaturisation des transistors. Enfin, des transistors en graphène seraient non seulement plus petits, mais aussi plus rapides : puisque les électrons s'y déplacent plus vite que dans n'importe quel matériau, l'information

Fig. 1 Les formes graphitiques du carbone



▲ Le graphène est le constituant de base de toutes les formes dites graphitiques du carbone. Enroulé, il permet de fabriquer un fullerène (en vert), molécule sphérique composée d'une soixantaine d'atomes. Repliée sur elle-même, une surface rectangulaire de graphène forme un nanotube de carbone (en rouge). En superposant plusieurs feuilles de graphène, on obtient cette fois un cristal de graphite (en bleu).

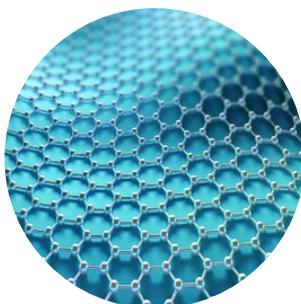
pourrait être transmise et traitée à une vitesse plus grande. Au vu des potentialités offertes par le graphène, on comprend que des multinationales comme IBM, Hewlett-Packard et Intel, mais aussi les laboratoires du département américain de la Défense, suivent de près ces développements et investissent dans des programmes de recherche, aussi bien publics que privés.

Pour que le graphène occupe la place qu'on lui promet, plusieurs défis technologiques doivent néanmoins être surmontés. Le premier concerne sa capacité à passer d'un état conducteur à un état isolant, autrement dit à acquérir des propriétés semi-conductrices. En raison de sa structure électronique, le silicium possède cette propriété. Et dans les transistors, une petite électrode, dite de « grille », fournit l'énergie nécessaire pour que le silicium passe d'un état à un autre. Le courant se propage ou ne se propage pas, et c'est ainsi que l'information peut être traitée par des « interrupteurs logiques ».

Plusieurs pistes sont explorées pour que le graphène acquière la même propriété. L'une d'elles consiste à découper, par faisceaux d'électrons, des rubans de graphène larges d'une dizaine de nanomètres. Les fruits récents de ces recherches ont été présentés lors du dernier colloque de la Société américaine de physique, par l'équipe de Philip Kim, de l'université Columbia. Elle a expliqué que, confinés dans de telles dimensions, les électrons de conduction sont caractérisés par de nouveaux états quantiques. Ils ne peuvent plus se propager que s'ils possèdent des niveaux d'énergie plus déterminés. En faisant varier l'énergie des électrons à l'aide d'une électrode, on peut déclencher ou empêcher leur propagation et agir sur le passage du courant.

En 2008 également, les équipes de Walter de Heer et d'Andre Geim ont pour leur part démontré que le graphène acquiert des propriétés semi-conductrices lorsque des atomes, soit d'oxygène, soit d'hydrogène, sont inclus par voie chimique dans le réseau cristallin (6). D'autres méthodes ont été proposées, mais elles présentent toutes le même défaut. Alors que les transistors en graphène sont censés se trouver dans leur isolant, de petites quantités de courant continuent tout de même à se propager.

Un autre verrou technologique est lié à la production à grande échelle du matériau. Depuis le printemps 2007, Graphene Industries, une société fondée par trois anciens doctorants



▲ La structure cristalline du graphène, constituée d'une répétition de motifs hexagonaux où les atomes sont situés à chacun des six sommets, rappelle celle d'un nid d'abeilles.

d'Andre Geim, commercialise du graphène exfolié. Sachant que 3 000 μm^2 sont vendus, en moyenne, 1 800 euros, 1 m^2 coûterait la somme astronomique de 600 milliards d'euros – deux fois plus que le budget annuel de la France! Mais la société britannique ne pourrait honorer une telle commande, puisque, en un an et demi, elle a produit moins d'1 mm^2 . Qui comble néanmoins les besoins « des laboratoires académiques, explique Peter Blake, directeur technique, qui ont représenté la moitié de nos clients. Les autres commandes étaient issues des laboratoires de recherche privés et de l'industrie des semi-conducteurs ».

FABRICATION À GRANDE ÉCHELLE

En décembre 2008, Graphene Works, installée à Atlanta, a rejoint ce nouveau marché. Elle commercialise du graphène épitaxié, avec des arguments autrement plus avantageux, puisque, selon l'un de ses membres, « le prix de vente est trente mille fois moins important à surface équivalente ». Les échantillons sont par ailleurs deux fois plus gros (typiquement 1 000 μm^2) et délivrés plus rapidement. Au moins deux autres sociétés de ce type devraient voir le jour en 2009, faisant a priori encore baisser les prix. Car en comparaison avec la synthèse de graphène exfolié, la méthode est beaucoup moins artisanale, et plus facilement contrôlable. Elle se prêterait bien mieux à une fabrication à grande échelle. Des progrès seront néanmoins nécessaires pour obtenir du graphène très pur et de bonne qualité cristallographique, sur de très larges surfaces. « Avant d'y parvenir, il faudra du temps... ajoute Claire Berger. Sans compter que les défis technologiques ne seront pas les seuls à prendre en compte. » Un système économique de plusieurs dizaines de milliards d'euros – l'industrie du silicium – ne se défait pas en quelques années. Aux sceptiques, Claire Berger rappelle tout de même « que le graphène est un tout jeune matériau, et qu'une vingtaine d'années avaient été nécessaires pour obtenir des transistors en silicium de qualité industrielle ». ■

(1) C. Berger et al., *J. Phys. Chem. B*, 108, 19912, 2004.

(2) K. Novoselov et al., *Science*, 306, 666, 2004.

(3) K. Novoselov et al., *Nature*, 438, 197, 2005.

(4) S. V. Morozov et al., *Phys. Rev. Lett.*, 100, 016602, 2008.

(5) M. Orlita et al., *Phys. Rev. Lett.*, 101, 267601, 2008.

(6) D. Elias et al., *arXiv:0810.4706v1*, 2008.

Et depuis ●●●



2018

Une équipe du MIT, aux États-Unis, montre que deux minces feuilles de graphène superposées avec un angle de 1,1°, qualifié de magique, se comportent comme un isolant ou un supraconducteur selon la tension appliquée.



ENTRETIEN AVEC **PETER HIGGS**

CE BOSON DE HIGGS SI ATTENDU

L'existence du boson de Higgs a été prédite dès 1964 par le physicien britannique du même nom. Sa découverte a soulevé l'enthousiasme et lui a valu le prix Nobel en 2013, remporté avec le Belge François Englert.

Propos recueillis par **Olivier Dessibourg**

La Recherche Avez-vous récupéré de votre « nobelitis », maladie imaginée par le physicien Sheldon Glashow, caractérisée par des trépignements peu avant l'annonce des prix Nobel, dont vous avez dit être affecté ?

Peter Higgs Oui. En 2013, elle a été particulièrement virulente à partir de la confirmation, en mars, que la particule découverte à l'été 2012 était bien celle que l'on cherchait... Après le tumulte lié à l'annonce du prix Nobel, j'espère que ma vie redeviendra plus normale, avec moins de sollicitations – même si j'en doute.

En 2007, vous disiez que vous seriez triste si l'on ne découvrait pas ce boson de Higgs. En avez-vous vraiment douté ?

Peu. J'ai souvent dit que si ce boson n'existait pas, cela signifierait que la structure théorique établie pour décrire la matière, le modèle standard, qui semble bien fonctionner, serait un non-sens. Ce boson est la signature du mécanisme par lequel toutes les autres particules acquièrent leur masse. Imaginer le contraire de cette théorie était donc très difficile.

Comment en êtes-vous venu à postuler cette particule ?

Après mes études au King's College de Londres, arrivé à l'université d'Édimbourg, j'étais un peu perdu dans mon cursus. Je me suis intéressé aux travaux du physicien japonais Yoichiro Nambu et du Britannique Jeffrey Goldstone. Le premier travaillait sur les supraconducteurs. Il a découvert les « brisures spontanées de symétrie »...

...et remporté pour cela le Nobel en 2008. Pour expliquer ce concept, vous utilisez l'image d'un bol en forme de sombrero mexicain.

Si vous placez une bille au fond d'un bol, elle se retrouve dans son état d'énergie minimale. Faites alors tourner le bol : peu importe l'angle de rotation, l'ensemble reste symétrique par rapport à la position originelle du bol. Prenez maintenant un bol avec un renflement au centre, comme un culot de bouteille. L'état d'énergie minimale pour la bille se trouve au fond du canal circulaire créé par le culot et la paroi du bol (elle ne peut glisser plus bas). Tournez alors un peu ce « bol mexicain » : la symétrie ne sera plus respectée par rapport à la position originelle du bol. Pourtant, sans la bille, le bol lui-même est symétrique.

C'est cela, la brisure spontanée de symétrie ?

En quelque sorte. Et Yoichiro Nambu a postulé que le vide qui nous entoure et qui correspond à l'état fondamental serait, comme le bol mexicain, empreint d'une telle brisure de symétrie. De son côté, Jeffrey Goldstone travaillait sur la « théorie quantique des champs ». Celle-ci considère les particules subatomiques comme des émanations ou fluctuations quantiques d'un champ sous-jacent.

Un peu comme un flocon soulevé par le vent serait l'émanation d'un champ de neige ?

Si l'on veut. Jeffrey Goldstone a alors publié un théorème crucial : si l'on considère une théorie





PETER HIGGS

1929 Il naît à Wallsend, au Royaume-Uni.

1954 Il obtient son doctorat en physique au King's College de Londres.

1964 Il publie dans *Physical Review Letters*

sa proposition de l'existence du champ de Higgs, et d'une particule associée.

1980 Il est nommé à la chaire de physique théorique de l'université d'Édimbourg.

1996 Il est professeur émérite à l'université d'Édimbourg.

2013 Il reçoit le prix Nobel de physique avec le Belge François Englert.

quantique des champs de manière relativiste, sous certaines conditions, soit le vide est bel et bien symétrique, soit il ne l'est pas – la symétrie est brisée, selon Yoichiro Nambu. Mais, alors, le vide devrait générer des particules sans masse et de spin (*) nul ! Or c'est là que le bât blesse : si de telles particules existaient, elles auraient dû être détectées facilement. Ce qui n'a pas été le cas.

Quel est le lien avec le boson de Higgs ?

J'étudiais aussi l'électrodynamique quantique, qui avait pour but de concilier l'électromagnétisme classique avec la mécanique quantique. C'était la seule réelle théorie à succès à l'époque. C'est en me promenant dans le parc de Cairngorms, dans les Highlands, que j'ai combiné des éléments de ces deux théories. J'ai trouvé une voie de sortie pour le paradoxe du théorème de Goldstone. Cela m'a permis de postuler, à l'aide de ce concept de brisure de symétrie, ce qui allait devenir le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (BEH) : tout l'espace qui nous entoure est empli d'un champ quantique, appelé champ de Higgs, qui permet à chaque particule baignant dans ce champ d'acquérir une masse

lorsqu'elle interagit avec lui. Et comme dans la théorie quantique des champs, il devait émaner de ce champ une particule. Mais, selon mes calculs, celle-ci devait être massive.

Plusieurs métaphores ont été proposées pour expliquer ce mécanisme complexe que – dit-on – seules quelques dizaines de scientifiques parviennent à décrire en détail. Avez-vous une préférence ?

Une image que je n'aime pas consiste à dire que la masse des particules est d'autant plus grande que celles-ci sont freinées dans le champ de Higgs à la manière d'une cuillère plus ou moins grosse qu'on traîne dans un pot de mélasse. Car cette description-là implique une dissipation d'énergie, ce qui n'est pas le cas dans le mécanisme BEH. Pour moi, l'explication la plus acceptable est celle d'une célébrité (symbolisant une particule) entrant dans une pièce remplie d'invités (imageant le champ de Higgs) qui l'accostent : même si sa vitesse de marche n'est pas réduite, la star zigzague, si bien qu'elle ne traverse pas la pièce aussi vite que si celle-ci était vide. Ainsi, sa progression est d'autant plus freinée qu'elle interagit avec l'assistance. Tout ●●●

(*) Le spin est une propriété quantique des particules élémentaires.

••• comme une particule devient d'autant plus massive qu'elle interagit avec le champ de Higgs. **Si c'est ce mécanisme, « matérialisé » par le boson de Higgs, qui donne leur masse aux autres particules, qu'est-ce qui donne sa masse... au boson de Higgs ?**

Le mécanisme BEH n'est pas la seule manière de générer la masse, comme on omet souvent de le dire. C'en est plutôt le point de départ. 99,9 % de la masse des particules non élémentaires, comme les protons ou les neutrons, viennent de la force nucléaire forte, qui tient ensemble leurs constituants, les quarks.

En 1964, était-ce difficile d'aller contre les idées reçues ?

Je trouvais que les idées de Yoichiro Nambu et Jeffrey Goldstone méritaient d'être creusées, c'est pourquoi j'ai insisté. J'ai envoyé un article décrivant mon mécanisme à la revue *Physics Letters*, dont les responsables étaient au Cern. Ils l'ont refusé. Je me suis dit qu'ils ne m'avaient pas compris et qu'ils me prenaient pour un plouc de province. Ils me demandaient de développer mes idées, en me renvoyant aux travaux de François Englert et Robert Brout, de l'université libre de

ont utilisé votre mécanisme de brisure de symétrie pour fusionner l'électromagnétisme et l'interaction nucléaire faible (responsable de la désintégration nucléaire).

Auriez-vous aimé avoir leurs idées ?

Ils se fondaient sur des travaux de Sheldon Glashow. J'ai été surpris et me suis dit : « *Oh, well, ils ont vu ce qu'il fallait faire.* » Et voilà. Dès lors, ce n'est pas qu'il ne restait plus rien à élaborer, mais l'essentiel avait été posé. Je n'étais pas jaloux. Une fois qu'une découverte a été réalisée, elle n'appartient plus à personne. Puis, au début des années 1970, Gerard 't Hooft et Martinus Veltman (eux aussi nobélisés, en 1999) ont rendu cette théorie électrofaible opérationnelle. Dès cette époque, je me suis fait distancer, car je ne parvenais plus à maintenir le bagage technique nécessaire pour suivre ce qui se faisait dans ce domaine.

Sur quoi avez-vous travaillé ensuite ?

Sur d'autres sujets, notamment liés à la théorie de la supersymétrie, qui prédit pour chaque particule l'existence d'une superparticule « miroir » beaucoup plus lourde. Mais sans grand succès. Je me suis alors consacré à l'enseignement.

Pendant ces cinquante dernières années, et voyant que d'autres physiciens se fondant sur vos travaux théoriques avaient obtenu le Nobel, avez-vous perdu espoir que votre tour viendrait ?

Parfois les résultats sont si évidents que la distinction tombe vite. Dans mon cas, ce prix était lié à la découverte de la particule prédite, ce qui ne pouvait se faire qu'avec une machine qui a demandé des décennies de planification et de construction.

Les gens du Cern, qui avaient refusé de publier votre théorie, se sont en effet bien « rattrapés » en permettant la découverte du boson de Higgs.

En 2012, la confirmation que ceux qui avaient construit l'accélérateur LHC et les détecteurs savaient ce qu'ils faisaient fut totale. Et aussi que la manière européenne de financer le projet – plusieurs pays assurant le budget du Cern – était gage de succès. L'annonce m'a tout de même surpris. Je ne l'escomptais pas si rapidement, même s'il a fallu attendre mars 2013 pour être certain que la particule découverte avait toutes les caractéristiques de ce boson.

Que pensez-vous du fait que certains physiciens se sont au contraire dits déçus, tant ils espéraient avoir découvert autre

« La découverte n'était possible qu'avec une machine demandant des décennies de construction »

Bruxelles, qui avaient publié les leurs dans la revue américaine *Physical Review Letters* le jour où le Cern avait reçu ma copie. À l'époque, il y avait un troisième groupe qui travaillait sur ce sujet, à l'Imperial College de Londres. Mais aucun de nous ne savait ce que faisaient vraiment les autres. C'est pourquoi, d'ailleurs, je n'ai rencontré François Englert qu'en juillet 2012, au Cern, lors de l'annonce de la découverte du boson (Robert Brout est décédé en 2011). Finalement, j'ai soumis une version augmentée de mon article à *Physical Review Letters*. Yoichiro Nambu était l'un des réviseurs. Ils ont publié mon article malgré celui de Robert Brout et François Englert, car ils estimaient qu'il s'en distinguait assez. Dans une note, j'ai mentionné en deux lignes l'existence possible d'une particule associée au champ de Higgs.

En 1967, Abdus Salam et Steven Weinberg



◀ L'artiste Xavier Cortada, avec l'aide du physicien Pete Markowitz, a créé « *In Search of the Higgs Boson* », une série de bannières dépeignant les expériences qui ont permis la découverte du boson de Higgs.

Vous évoquez entre les lignes une « théorie du tout », qui engloberait toutes les lois physiques. Est-ce sensé d'espérer la trouver un jour ?

Aujourd'hui, la théorie qui serait la plus à même de la concrétiser est celle dite des « supercordes », dont l'idée de base est de modéliser les particules et les forces de la nature comme les vibrations de minuscules cordes dans un espace supersymétrique. Est-ce là une étape nécessaire, ou suffisante ? Je ne sais pas. Mais cela donne du grain à moudre aux théoriciens. En revanche, cette théorie contient aussi un hic : elle postule l'existence de beaucoup trop de solutions pour des types d'univers très différents de celui dans lequel nous vivons. Au lieu d'en voir « sortir » simplement ce qu'on recherche, à savoir une manière d'unifier tout ce que nous connaissons dans l'Univers qui est le nôtre.

Les physiciens auront-ils toujours les moyens de mener ces recherches fondamentales ?

Il y a certes des difficultés chez certains politiciens à reconnaître qu'il existe des liens évidents entre les sciences fondamentales, considérées comme peu importantes pour l'économie, et les technologies applicables. Or le nier découle d'une vision à très court terme.

Mais maintenant que l'on a découvert le boson de Higgs, les futurs accélérateurs devront être présentés aux décideurs comme des machines à arpenter l'inconnu. Vu leurs énormes coûts, est-ce que cela pourra être assez convaincant ?

La décision de se lancer dans la construction d'un nouvel accélérateur se précisera en fonction de ce que l'on découvrira avec le LHC à pleine énergie, dès 2015. Si l'on entrevoit des particules supersymétriques, l'intérêt sera attisé. D'aucuns disent qu'il faut des machines plus puissantes pour mieux étudier le boson. Les Chinois se disent prêts à construire une « usine à Higgs », un accélérateur circulaire de 100 kilomètres, sept fois plus puissant que le LHC. S'ils le font, cela incitera peut-être les autres nations à s'unir pour construire un accélérateur linéaire, probablement au Japon. Reste alors à savoir ce qu'il adviendra du Cern. Quoi qu'il en soit, je souhaite bon vent aux physiciens dans leur quête visant à saisir les infinis détails du monde qui nous entoure. ■

chose d'inattendu, qui ouvrirait la porte à des champs d'exploration inédits ?

Cette réaction me semble étrange. Cela aurait constitué un défi immense pour les théoriciens, car toutes les théories actuelles seraient tombées en ruine. En ce qui me concerne, je suis plutôt content. Ce qui me déçoit un peu – c'est vrai –, c'est que la découverte de ce boson ne s'accompagne d'aucune piste permettant d'élaborer plus encore le modèle standard, de réfléchir plus loin.

Qu'attendez-vous de la relance du LHC, en 2015, avec une énergie deux fois plus grande que celle en jeu jusque-là ?

Qu'on découvre peut-être d'autres bosons. La version la plus simple de la supersymétrie indique qu'il pourrait en exister cinq. J'en suis fan. Mon enthousiasme s'appuie sur le fait que cette théorie pourrait englober la gravité. Car, actuellement, elle n'est pas incluse dans le modèle standard, ce qui constitue un problème. De plus, le LHC, dès 2015, pourrait fournir des premiers indices concernant la composition de la matière noire, entité dont la nature est inconnue.

Et aussi...

Premiers pas des machines moléculaires

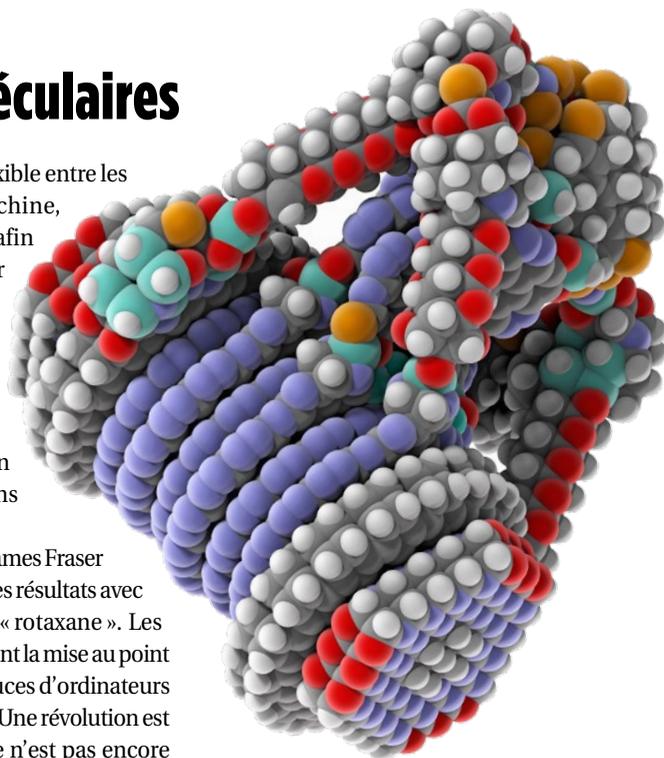
1983 Les machines moléculaires fascinent sans qu'on mesure encore l'étendue de leurs domaines d'applications... Et elles ont valu le prix Nobel de chimie en 2016 à un Français de l'université de Strasbourg, Jean-Pierre Sauvage. Prix partagé avec le Britannique James Fraser Stoddart et le Néerlandais Bernard Feringa. L'idée est de s'inspirer des machines moléculaires qui existent dans le vivant à l'échelle nanométrique pour en fabriquer de manière synthétique.

Les machines du vivant, composées de plusieurs molécules, réalisent des actions mécaniques lorsqu'on leur envoie de l'énergie. Par exemple, des machines d'assemblage fabriquent des molécules d'ADN, des protéines à base de flagelles déplacent des cellules. Pour synthétiser une machine moléculaire, en 1983, Jean-Pierre Sauvage et son équipe réussissent, en utilisant un ion de cuivre, à créer une liaison

temporaire souple et flexible entre les molécules de leur machine, baptisée « caténane », afin qu'elles puissent bouger les unes par rapport aux autres (1). Puis, en 1994, la même équipe parvient à contrôler le mouvement de deux molécules entrelacées en jouant avec des réactions d'oxydation-réduction.

De son côté, l'équipe de James Fraser Stoddart atteint les mêmes résultats avec une structure nommée « rotaxane ». Les années 2000 et 2010 verront la mise au point des premiers muscles, puces d'ordinateurs et moteurs moléculaires. Une révolution est en marche, même si elle n'est pas encore sortie du laboratoire. ■

(1) C. O. Dietrich-Buchecker *et al.*, *Tetrahedron Lett.*, 24, 5095, 1983.



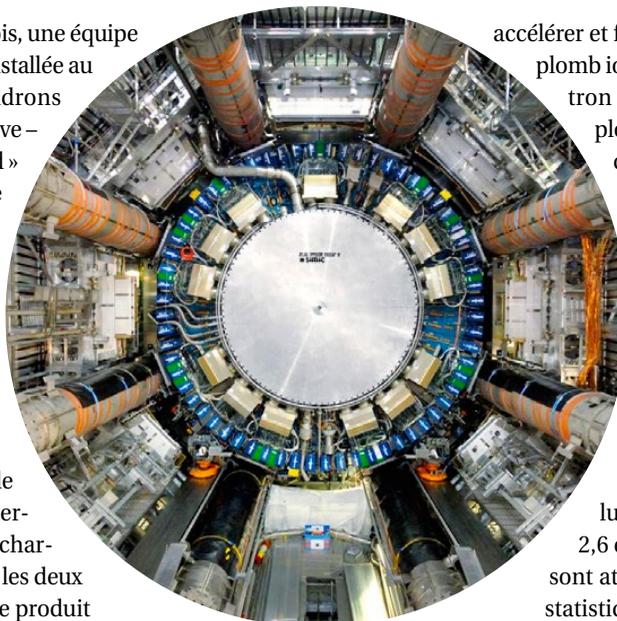
▲ Voici un exemple de machine moléculaire - système chimique inspiré de la biologie - conçue pour contrôler le mouvement.

L'interaction entre deux photons au LHC

2017 En 2017, pour la première fois, une équipe de la collaboration Atlas – installée au grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern, près de Genève – met en évidence le « rebond » de deux photons l'un contre

l'autre, phénomène prévu par la mécanique quantique (1). Particules de lumière, deux photons peuvent, par diffusion mutuelle, changer de trajectoire, comme des boules de billard qui s'entrechoqueraient.

Prévu par la mécanique quantique, ce processus de diffusion de la lumière par la lumière fait intervenir un échange de particules chargées, comme des électrons, entre les deux photons. Mais cette interaction se produit très rarement, d'où la difficulté à la mesurer. Utilisé en général pour faire entrer en collision des protons, le LHC peut aussi



▲ Le détecteur de particules Atlas, du grand collisionneur de hadrons du Cern, a observé le rebond de deux photons l'un contre l'autre.

accélérer et faire s'entrechoquer des noyaux de plomb ionisés, c'est-à-dire sans aucun électron autour. Lorsque deux noyaux de plomb se croisent sans se « toucher », deux photons, associés à chacun des noyaux, peuvent interagir et, parfois, produire deux photons d'énergie élevée. C'est ce qui a été observé par la collaboration Atlas. Parmi les 4 milliards de collisions entre des noyaux de plomb accumulées en 2015 par Atlas, l'équipe a trouvé 13 événements compatibles avec le processus de diffusion de la lumière par la lumière, alors qu'en moyenne seuls 2,6 événements dus au bruit de fond sont attendus après sélection. L'excès est statistiquement significatif: il prouve que l'observation relève bien d'un processus de diffusion de la lumière par la lumière. ■

(1) Collaboration Atlas, *Nature Physics*, 13, 852, 2017.

ENTRETIEN AVEC **HENRI DARMON**

DE LA CONJECTURE DE FERMAT AU THÉORÈME

En démontrant le théorème de Fermat, le Britannique Andrew Wiles a résolu une énigme sur laquelle nombre de professionnels et amateurs s'étaient cassé les dents au fil des siècles, comme le raconte le mathématicien Henri Darmon.

Propos recueillis par **Philippe Pajot**

La Recherche Pouvez-vous nous rappeler ce qu'est la conjecture de Fermat ?

Henri Darmon En mathématiques, une conjecture correspond à une assertion qui n'a encore jamais été démontrée. Une fois qu'elle est démontrée, elle devient un théorème. Prenons trois nombres entiers naturels x, y, z et un exposant n , entier également. Au XVII^e siècle, le mathématicien toulousain Pierre de Fermat propose que l'équation $x^n + y^n = z^n$ n'admet pas de solution dès lors que n est un entier supérieur à 2. Il prétend, dans une note écrite dans la marge d'un livre, avoir trouvé une démonstration générale simple, mais qu'il n'a pas la place de l'écrire. D'où le nom historique de ce problème que l'on appelle parfois « grand théorème de Fermat » ou « dernier théorème de Fermat ». Aucune preuve générale de cette conjecture n'ayant été trouvée pendant plusieurs siècles ni aucun contre-exemple, l'énoncé facile à comprendre prit peu à peu la dimension d'une légende.

C'est pour cela qu'en 1993, lorsque le mathématicien britannique Andrew Wiles annonce un colloque démontrant la conjecture, il suscite un coup de tonnerre ?

Oui, lorsqu'Andrew Wiles fait cette présentation, la conjecture de Fermat est l'un des problèmes ouverts les plus célèbres en mathématiques. Pour des raisons historiques d'abord : le problème, alors vieux de près de 350 ans, a acquis une envergure imposante. Pierre de Fermat avait connu un



▲ *Magistrat et mathématicien toulousain, Pierre de Fermat (première décennie du XVII^e siècle - 1665) a proposé la conjecture qui porte son nom.*

certain succès pour des cas particuliers. D'autres grands noms des mathématiques – Leonhard Euler, Sophie Germain, Ernst Kummer et Richard Dedekind – s'y sont attaqués avec des résultats partiels, mais sans en venir à bout. La conjecture connaît un regain de popularité dans les années 1920 quand l'industriel allemand Paul Wolfskehl offre un prix pour sa démonstration, d'une valeur considérable à l'époque. Les amateurs se laissent tenter, car elle est d'une simplicité trompeuse puisqu'il suffit de savoir multiplier et additionner les entiers pour en comprendre l'énoncé!

Après tout, c'est à 11 ans qu'Andrew Wiles a pris connaissance du problème et s'est mis à y réfléchir pour la première fois... Par ailleurs, plusieurs tentatives pour la démontrer ont engendré des outils mathématiques dont l'importance dépasse celle de la question originale. C'est surtout cela qui fascine les mathématiciens professionnels.

Quelles ont été les grandes voies d'attaque des travaux précédents ?

La conjecture a été démontrée d'abord pour $n=4$ par Fermat au XVII^e siècle puis, au XVIII^e siècle, pour $n=3$ par Euler. Leurs démonstrations font intervenir la méthode de descente de Fermat ou méthode de descente infinie. On admet que l'égalité est vérifiée pour un triplet (x, y, z) et on fabrique, à partir de cette solution, une solution nouvelle faisant intervenir des entiers encore plus petits ; en répétant le procédé, on aboutit à une contradiction puisqu'une suite ●●●

... d'entiers strictement décroissante ne peut pas se poursuivre indéfiniment. Les choses se corsent dans la deuxième partie du XVIII^e siècle avec la théorie des idéaux et les nombres de classes des corps cyclotomiques, de puissants outils permettant à l'Allemand Kummer de démontrer la conjecture pour tous les exposants plus petits que 100. Enfin, la démonstration d'Andrew Wiles passe par la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil, une des questions les plus centrales dans la théorie des courbes elliptiques (*) (Fig. 1). Cette dernière relie en effet les courbes elliptiques, objets de nature a priori purement algébrique, à des fonctions modulaires, qui surviennent dans le monde de l'analyse de Fourier, l'étude des unes apportant un éclairage nouveau et profond sur notre connaissance des autres. C'est pourquoi la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil occupe une position privilégiée : c'est une sorte de clé de voûte dans l'imposant édifice du programme de Langlands, qui occupe encore aujourd'hui la recherche mathématique en théorie des nombres (1).



HENRI DARMON

1965 Il naît à Paris.
 1991 Il présente sa thèse à l'université Harvard.
 1991-1995 Il fait son postdoctorat avec Andrew Wiles à l'université de Princeton.
 2000 Il devient professeur à l'université McGill, au Canada.

Comment la situation a-t-elle été débloquée ?

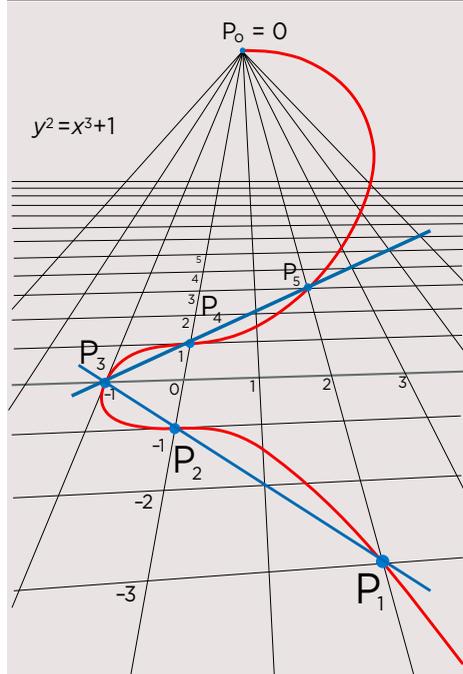
Dans les années 1970, le mathématicien français Yves Hellegouarch propose d'associer à une solution de l'équation de Fermat une courbe elliptique aux propriétés insolites, jetant un pont entre deux domaines jusqu'alors disparates de la théorie des nombres. Le mathématicien allemand Gerhard Frey fait la supposition – très originale et surprenante à l'époque – que cette courbe elliptique pourrait ne pas être modulaire, ce qui la mettrait en violation de la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil, qui affirme que toutes les courbes elliptiques possèdent cette propriété. L'Américain Ken Ribet démontre alors rigoureusement que la courbe de Hellegouarch-Frey ne peut pas être modulaire, et par conséquent, que la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil implique le théorème de Fermat. Cela le met au centre des mathématiques modernes : pour les adeptes du programme de Langlands, impossible désormais de l'ignorer ! Mais la partie est encore loin d'être gagnée : le quasi-consensus en 1993 – qu'Andrew Wiles est sans doute le seul à ne pas partager – est que la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil est encore plus difficile à démontrer que celle de Fermat.

Lorsqu'il entend parler de la supposition de Gerhard Frey, Andrew Wiles décide de s'attaquer à la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil. Mais il y travaille alors durant huit ans en secret, sans dire sur quoi portent ses travaux. Cela est-il fréquent en mathématiques ?

Je pense que c'est assez rare. Les mathématiques deviennent de plus en plus collaboratives. Andrew Wiles a lui-même entretenu plusieurs collaborations importantes au cours de sa carrière : avant de démontrer le théorème de Fermat, il s'était illustré par des travaux décisifs sur les courbes elliptiques avec son directeur de thèse, John Coates, puis sur

(*) Les fonctions elliptiques sont des courbes définies par des fonctions cubiques en x et y (de forme générale $y^2 = x^3 + ax + b$).

Fig. 1 Une courbe clé



▲ Sur cette courbe elliptique, on peut définir une addition entre des points particuliers, par exemple $P_3 + P_4 = P_1$ et $P_2 + P_3 = P_5$.

les corps cyclotomiques et la théorie d'Iwasawa, avec Barry Mazur. Et c'est en compagnie de son ancien étudiant, Richard Taylor, qu'il vient à bout des dernières difficultés dans la démonstration du théorème de Shimura-Taniyama-Weil. Ensemble, ils mettent au point la méthode de Taylor-Wiles qui a ensuite révolutionné le domaine. Une des percées toutes récentes dans les questions de modularité, qui étend notamment le théorème de Wiles à des corps de nombres plus généraux, est traitée dans un article écrit par dix auteurs venant de sept pays différents!

Quand il présente ses travaux pour la première fois, Andrew Wiles s'aperçoit qu'il y a un trou dans sa démonstration.

A-t-il eu du mal à le combler?

Je pense que les difficultés ont aussi dû être de nature psychologique : la notoriété de ce problème met beaucoup de pression sur qui prétend l'avoir démontré. Andrew Wiles était alors à l'université de Princeton. Pour ses disciples, parmi lesquels j'ai eu le privilège de figurer, étant son postdoctorant à l'époque, il n'a jamais fait de doute, même après la découverte du trou dans la démonstration, que le travail accompli ouvrait quand même une brèche décisive. Les jours de la conjecture de Fermat étaient alors comptés. Mais pour Andrew Wiles, seul au cœur de la tourmente, cela a dû être difficile. Il lui a fallu une grande force de caractère pour se concentrer sur le problème et en venir à bout, tout en étant l'objet d'une couverture médiatique intense. C'est finalement en octobre 1994 que le travail final avec Richard Taylor est publié et que la conjecture de Fermat est devenue le théorème de Fermat-Wiles.

Les techniques mises en œuvre par Andrew Wiles et Richard Taylor utilisaient-elles des outils très novateurs?

Certainement! La théorie des nombres n'a pas fini d'épuiser les possibilités qu'offre cette merveilleuse démonstration. Depuis 1994, des problèmes autrefois jugés inaccessibles sont résolus avec une régularité époustouflante : la conjecture d'Artin pour les représentations



▲ À l'issue de trois conférences qu'il donne en juin 1993 à Cambridge, Andrew Wiles esquisse la démonstration de la conjecture de Shimura-Taniyama-Weil qui entraîne le théorème de Fermat. La démonstration sera terminée en 1994.

icosahédrales, la conjecture de modularité de Serre (lire *La Recherche* n° 442, p. 18), la conjecture de Sato-Tate. Les modularités dans des contextes de plus en plus généraux (courbes elliptiques sur les corps de nombres, surfaces abéliennes, etc.) succombent une par une aux raffinements, souvent spectaculaires et difficiles, de la démarche d'Andrew Wiles.

Cette démonstration met-elle un point final au problème ou soulève-t-elle d'autres questions?

Les progrès accomplis par Andrew Wiles dans les questions de modularité et dans le programme de Langlands ont engendré une foule de questions, motivées par le désir d'étendre la portée de la méthode. En effet, des grands pans du programme de Langlands semblent encore inaccessibles, même après la révolution Taylor-Wiles. Ce domaine de la théorie des nombres n'est jamais en reste de problèmes ouverts difficiles et importants, et il y en a sans doute encore plus aujourd'hui qu'au siècle dernier.

Finalement, la fameuse démonstration simple que Fermat disait avoir trouvée et qu'il n'avait pas la place d'écrire, pensez-vous qu'elle puisse exister?

Je ne le crois pas. Les mathématiciens, tant professionnels qu'amateurs, sont pleins de ressources. Si la démonstration de Fermat existait, quelqu'un l'aurait retrouvée. On peut dire que cette note dans la marge fut une forfanterie féconde! ■

(1) Philippe Pajot, « Le prix Abel attribué à une figure de la théorie des nombres », *La Recherche* n° 535, mai 2018, p. 28.

« La théorie des nombres n'a pas fini d'épuiser les possibilités qu'offre cette démonstration »

L'ALGORITHME DE SHOR, CLÉ DU CALCUL QUANTIQUE

L'algorithme mis au point par l'Américain Peter Shor ouvre la voie à l'ordinateur quantique et à la factorisation de très grands nombres en un temps record.

Sophie Laplante, informaticienne

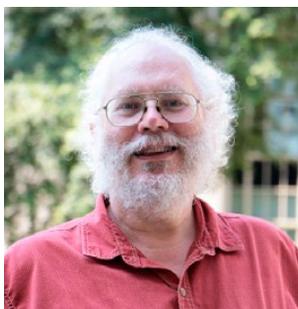


Depuis la découverte, en 1994, par Peter Shor, informaticien américain de la compagnie AT & T, d'un « algorithme quantique » permettant de factoriser des grands nombres

en un temps relativement court, les recherches dans le domaine de l'informatique quantique ont pris un essor considérable (1). L'algorithme de Shor est composé de deux parties. La première transforme le problème de factorisation en un problème de recherche de la périodicité d'une fonction mathématique, ce qui peut être réalisé de manière « classique ». La seconde trouve la période à l'aide d'une opération appelée « transformée de Fourier quantique », une technique algorithmique permettant de déterminer le spectre de fréquences d'un signal.

L'article de Peter Shor eut un impact retentissant du côté des cryptographes ! En effet, la plupart des protocoles, comme ceux utilisés pour assurer la confidentialité d'une carte bancaire, reposent sur la complexité de la factorisation ou d'opérations mathématiques similaires. Bien sûr, en 1994, et c'est encore vrai aujourd'hui, aucune machine capable d'utiliser l'algorithme de Shor n'existait. L'inquiétude des experts en sécurité informatique était néanmoins importante.

Mais le scepticisme dominait. Nombre de physiciens, et non des moindres, se sont empressés de dénoncer l'impraticabilité de l'algorithme de Shor. « Face à certaines promesses irréalistes d'applications pratiques en un domaine où tant de prévisions excessivement optimistes ont déjà été formulées, nous estimons nécessaire une mise en garde... », écrivaient dans nos colonnes en



▲ Les travaux de Peter Shor dans le domaine de l'informatique quantique ont eu un impact retentissant, notamment auprès des cryptographes.

1996 Serge Haroche et Jean-Michel Raimond, de l'École normale supérieure. *Plutôt que de nous apprendre comment fabriquer un ordinateur quantique de grande taille, il est plus vraisemblable que de telles expériences nous renseignent sur les processus qui feraient en définitive échouer une telle entreprise (2).* »

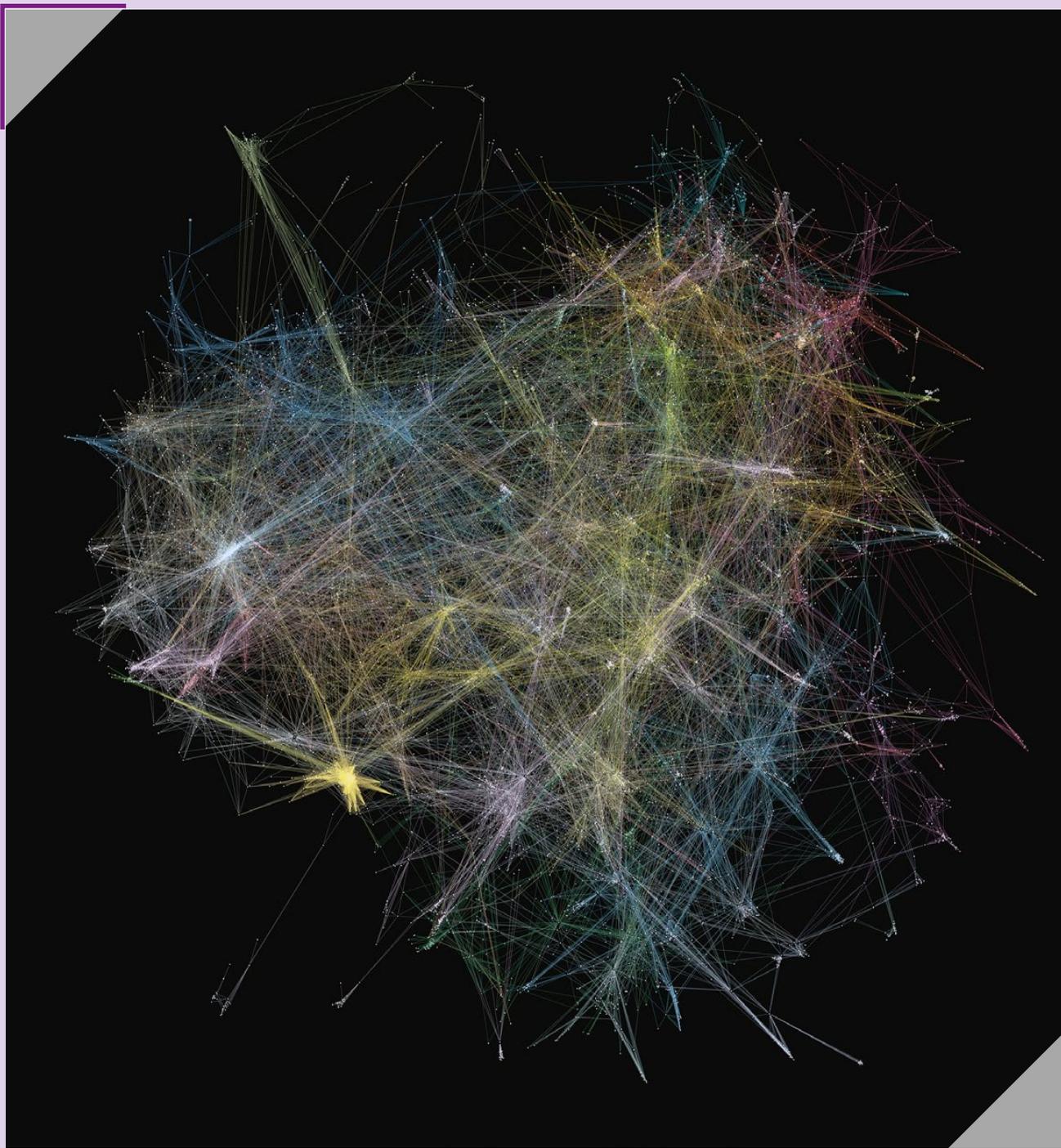
LA FRAGILITÉ EN QUESTION

Les physiciens « sceptiques » se focalisaient sur la fragilité de l'information quantique. Dans un ordinateur classique, la nature binaire de l'information la rend très « robuste ». Pour que des erreurs de calcul se produisent, la seule manière est qu'un transistor bascule spontanément de l'état « 0 » à l'état « 1 », ce qui est extrêmement rare. En revanche, un bit quantique, un « qubit », se trouve dans un état très fragile, car le système physique qui le porte doit être soumis à des contraintes sévères. Le qubit doit être bien isolé de son environnement, afin que le phénomène de décohérence ne se produise pas. Auquel cas, l'état de superposition quantique serait détruit. En outre, une variation même infime de l'état de superposition se propagerait aux autres qubits. Dès 1995, des solutions pour corriger et stabiliser l'information contenue dans un qubit ont été proposées. Grâce aux travaux de Peter Shor, la discipline a gagné en crédibilité, et plusieurs physiciens et informaticiens de renom se sont lancés dans la course à l'ordinateur quantique. ■

(1) P. Shor, Proc. IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science, 124, 1994.

(2) S. Haroche et J.-M. Raimond, « L'ordinateur quantique : rêve ou cauchemar ? », La Recherche n° 292, novembre 1996, p. 58.

SOPHIE LAPLANTE est informaticienne, spécialiste de la complexité. Elle est professeure à l'université Paris-Diderot.



L'ART ABSTRAIT DU RÉSEAU

Ce réseau, constitué de 8873 nœuds et 33192 liens, représente la complexité des réseaux hétérogènes et distribués dits « sans échelle » utilisés en mathématiques. Cette œuvre numérique de Kirell Benzi, intitulée La Force de la collaboration, a été construite avec les archives de l'École polytechnique fédérale de Lausanne - mises en ligne dès 1998 - pour dépeindre la collaboration scientifique.

LA CONJECTURE DE POINCARÉ DÉMONTRÉE

En 2006, le Russe Grigori Perelman refuse la médaille Fields. Il vient pourtant de résoudre la conjecture de Poincaré, qui a donné du fil à retordre à nombre de ses prédécesseurs en près d'un siècle.

Gérard Besson, mathématicien

Si la difficulté d'un problème mathématique se mesurait au nombre de médailles Fields attribuées à ceux qui l'ont résolu, la conjecture de Poincaré serait classée bonne première. En

effet, la plus haute distinction de la communauté mathématique a couronné trois fois, en 1966, 1986 et 2006, une avancée majeure dans la résolution du problème. En août 2006, son dernier récipiendaire, le Russe Grigori Perelman, l'a refusée. Pourtant, il la méritait amplement. La conjecture de Poincaré est, grâce à lui, aujourd'hui démontrée après presque un siècle de recherches. En effet, entre novembre 2002 et juillet 2003, trois articles de Grigori Perelman postés sur le site arXiv.org ont mis en émoi les mathématiciens (1). Les écrits du mathématicien russe étant plus des esquisses que des preuves au sens strict, il s'est ensuivi quelques polémiques dont les journaux non scientifiques se sont fait l'écho avec délectation. Il n'empêche. Après quatre années de travail, nous sommes aujourd'hui convaincus que « la sphère est le seul espace compact simplement connexe de dimension 3 », ainsi que le prédisait Henri Poincaré en 1904, à la suite de l'ensemble de ses travaux, en particulier sur la relativité générale et les équations différentielles.

Pour comprendre les termes de cette conjecture, le plus simple est de partir des espaces à deux dimensions, c'est-à-dire des surfaces habituelles. On peut les classer dans une catégorie, qui rassemble celles qui peuvent se déformer continûment de l'une en l'autre. Par exemple, la surface d'un ballon de football peut être étirée de manière



continue en celle d'un ballon de rugby, ou même repliée sous la forme d'un bol. Chaque catégorie se représente par un nombre fini de bouées collées les unes aux autres. Le nombre de trous ou de bouées est appelé le genre de la surface.

La surface de la sphère – ou du bol – est celle d'une bouée sans trou. Son genre est nul. Elle est la seule à être simplement connexe, c'est-à-dire à posséder la propriété suivante : toute courbe fermée tracée sur elle peut se déformer de manière continue, sans se briser, jusqu'à devenir un point. En effet, sur un tore (une bouée mathématique à un seul trou) ou sur des surfaces de genre supérieur, les courbes qui en font le tour n'ont pas cette propriété. C'est encore plus vrai quand la surface est constituée de plusieurs morceaux séparés.

Mais ce qui est facilement concevable en deux dimensions l'est beaucoup moins aux dimensions supérieures. Il fallut plus de cinquante ans pour que Stephen Smale, de l'université de Chicago, démontre la conjecture de Poincaré dite généralisée. En 1960, il résolut la conjecture dans les espaces de dimension supérieure à 5, ce qui lui valut la médaille Fields en 1966 (2). Puis, en 1982, Michael Freedman, actuellement au laboratoire de recherche de Microsoft dans la Silicon Valley, prouva sa véracité en dimension 4 (3). Quatre ans plus tard, il fut lui aussi médaillé Fields. La conjecture de Poincaré, qui ne se préoccupe que des espaces en trois dimensions, a résisté vingt ans de plus, jusqu'aux travaux de Grigori Perelman. Avant lui, les mathématiciens qui s'y sont attaqués ont développé une remarquable variété de concepts qui font aujourd'hui partie de l'outillage standard de tout spécialiste de topologie. Mais,



▲ En 1904, en travaillant sur la relativité générale et les équations différentielles, le mathématicien Henri Poincaré prédit que « la sphère est le seul espace compact simplement connexe de dimension 3 ».

à elle seule, cette branche des mathématiques n'a pas été suffisante pour résoudre le problème. Une étape fondamentale fut franchie à partir des années 1970 par le mathématicien américain William Thurston. Il ajouta à ce problème de topologie une composante géométrique. Pour comprendre ses travaux, il faut revenir aux définitions. Celle de l'espace tangent tout d'abord. Sur chaque point de l'espace étudié, la sphère par exemple, les vecteurs tangents des courbes qui passent par un point

peuvent s'additionner et être multipliés par un nombre quelconque. Ils forment un espace vectoriel appelé espace tangent. Définir un instrument de mesure sur cet espace tangent, une géométrie au sens étymologique du terme, consiste à associer à chaque point de l'espace un produit scalaire, qui est une mesure à la fois de la longueur et de l'écart angulaire entre les différents couples de vecteurs. L'ensemble des produits scalaires en chaque point est appelé une métrique riemannienne. L'espace doté de cette métrique est appelé une variété riemannienne. On peut y définir une distance entre deux points quelconques : c'est la longueur d'une géodésique, la courbe la plus courte qui les joint. Il existe une infinité de métriques possibles, mais certaines sont spéciales. C'est le cas lorsque, localement, la métrique est celle d'un espace euclidien, sphérique ou hyperbolique, des variétés qui se différencient par exemple par le nombre de parallèles passant par un point extérieur à une droite. Il n'y en a qu'une dans un espace euclidien, aucune dans un espace sphérique et une infinité dans un espace hyperbolique. Enfin,

dernière définition, celle de la courbure. Elle mesure des écarts de longueurs des géodésiques ou d'angles. Dans ce dernier cas, il s'agit de la différence entre la somme des angles d'un triangle dans l'espace considéré et 180° , qui est la somme des angles d'un triangle dans un espace euclidien. Cette courbure peut varier d'un point à un autre. Si elle est indépendante du point où on la calcule, on dira qu'elle est constante.

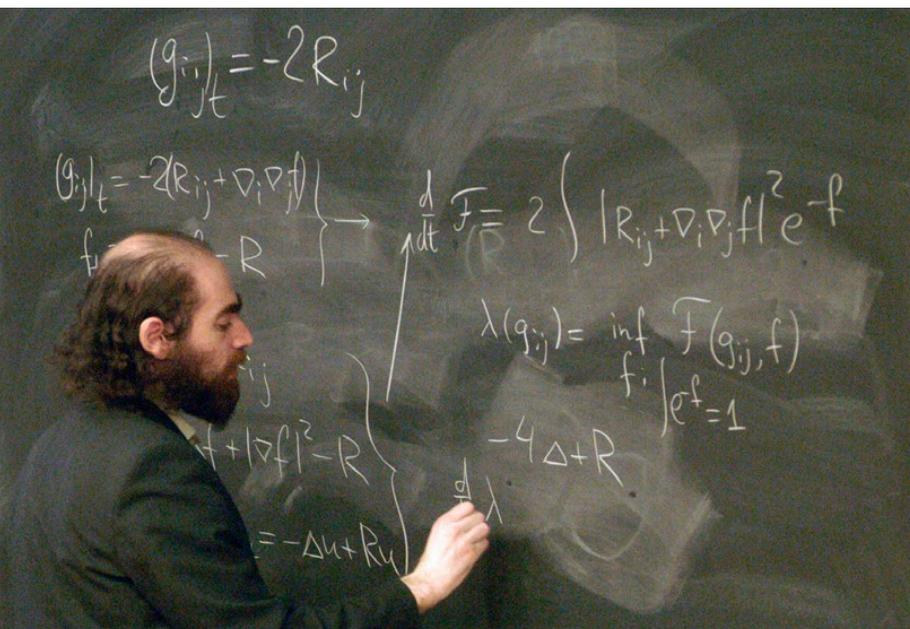
UNE DOSE DE GÉOMÉTRIE

C'est le cas de l'espace euclidien, qui est de courbure constante nulle. Il est dit plat. La sphère est de courbure constante positive, tandis que l'espace hyperbolique est de courbure constante négative. Un ensemble de travaux a conduit, au début du XX^e siècle, à un résultat important : la géométrie de toute surface à deux dimensions est sphérique sur la sphère, plate sur les surfaces de genre un (la bouée) et hyperbolique sur toutes les autres (celles de genre supérieur à un).

À l'instar de Poincaré, William Thurston s'est intéressé aux espaces à trois dimensions. Il a proposé une conjecture selon laquelle « *tout espace compact à trois dimensions peut être décomposé en morceaux de géométrie particulière* » (4). Peter Scott, de l'université du Michigan, venait de ●●

▲ Dans cet exemple en deux dimensions, les zones de courbure négative (en bleu) se dilatent, tandis que les zones de courbure positive (en rouge) se contractent jusqu'à former une sphère. C'est ce type de déformation, mais pour des surfaces à trois dimensions, qui est à la base de la conjecture de Poincaré.

GÉRARD BESSON est mathématicien, directeur de recherche CNRS et directeur de l'Institut Fourier, laboratoire de mathématiques de l'université de Grenoble.



••• montrer qu'il en existe huit possibles : les trois géométries de la situation à deux dimensions sphérique, euclidienne et hyperbolique, mais aussi cinq autres possédant toutes d'importants groupes de symétries. En déplaçant la conjecture de Poincaré sur le terrain de la géométrie, William Thurston a indiqué une nouvelle manière de montrer qu'un espace compact simplement connexe est une sphère : il suffit de prouver l'existence d'une géométrie sphérique sur tout cet espace. Il a résolu sa conjecture dans des cas particuliers importants, mais n'a pas réussi à généraliser. Néanmoins, en intégrant dans cette histoire une dose de géométrie, il a ouvert la boîte de Pandore. Car, avec la géométrie, c'est toute l'analyse qui s'est ensuite engouffrée dans ce problème de topologie.

En 1982, l'année même où William Thurston publiait sa conjecture, le mathématicien américain Richard Hamilton mit en effet au point une méthode originale pour s'attaquer aux problèmes proposés par Poincaré et Thurston. Selon lui, la géométrie sphérique, dont on cherche à montrer l'existence, doit minimiser une fonction qu'on peut associer à une sorte d'énergie, calculée à l'aide de sa courbure. Il construisit ainsi, par déformation continue, une famille de métriques g qui, partant d'une métrique quelconque, devrait conduire à la géométrie sphérique (5). Sa famille de métriques dépend d'un paramètre que nous pouvons métaphoriquement appeler le temps.

▲ *Le mathématicien russe Grigori Perelman a démontré la conjecture de Poincaré en 2003. Il donne ici, la même année, une conférence à New York pour présenter ses résultats.*

Elle satisfait l'équation $dg/dt = -2\text{Ric}(g(t))$. Le premier membre représente la dérivée de la métrique en fonction du temps. Le second membre est une version de la notion de courbure, appelée courbure de Ricci. C'est un objet de même nature que la métrique, puisqu'il s'agit d'associer à chaque point de l'espace tangent une forme bilinéaire qui ressemble à un produit scalaire. De la sorte, l'équation ci-dessus définit comment varie la métrique dans le temps, ce que nous appelons « le flot de la courbure de Ricci ».

En appliquant cette équation à un espace compact simplement connexe, celui-ci doit se déformer progressivement jusqu'à devenir une sphère. Le fait que la courbure soit celle de la métrique dont on prend la dérivée implique que l'équation est non linéaire, c'est-à-dire que la somme de deux de ses solutions n'est en général pas une solution. Elle entre dans le cadre des équations aux dérivées partielles. Cela signifie que l'équation différentielle du flot de Ricci n'admet qu'une unique famille de métriques qui vaut une métrique donnée au temps 0. Elle n'existe a priori que pour une durée donnée petite. Au-delà, on ne peut généralement rien dire, parce qu'une équation non linéaire peut diverger en temps fini. Cette existence en temps petit (c'est le terme mathématique adéquat) est essentiellement un résultat d'analyse mathématique.

CHIRURGIE MATHÉMATIQUE

Richard Hamilton a montré que le flot de Ricci s'arrête si, au cours du temps, la courbure devient infiniment positive et seulement dans ce cas. En effet, la métrique n'est alors plus riemannienne. Elle est dite dégénérée. Pour éviter ce problème, il a suggéré une procédure remarquable, que nous appelons maintenant la chirurgie. Elle consiste à éliminer les parties de grande courbure, celles qui vont devenir infinies donc dégénérées, en coupant la variété et en rebouchant les trous par des objets standard. Des problèmes techniques l'ont bloqué dans la poursuite de son programme. Et c'est Grigori Perelman qui a résolu ces difficultés. La finesse et la virtuosité technique des arguments qu'il a développés sont époustouflantes. Il a décrit ce qui se passe dans le voisinage d'un point où la courbure est plus grande qu'un nombre fixé. Il a montré que, quand la métrique riemannienne développe une grande courbure en certains endroits de la variété, celle-ci peut se

représenter localement par deux modèles. Il s'agit d'un cylindre à trois dimensions ou d'un capuchon standard, un cylindre bouché d'une forme dont la métrique est explicitement connue, telle celle d'une demi-sphère. Ainsi, là où la courbure est grande, la variété est connue puisqu'elle équivaut à un cylindre ou à un capuchon. Au contraire, là où les choses semblent se passer le plus normalement du monde, nous ne savons rien.

GRANDE COURBURE PARTOUT

On peut tirer un grand bénéfice de cette description. Si la courbure est grande partout, la variété est alors constituée de cylindres ou de capuchons standard. Les topologies possibles sont alors limitées. Notre objet est un tore à trois dimensions s'il est constitué d'une suite de cylindres qui vont s'emboîter les uns dans les autres. Il est une déformation continue d'une sphère s'il possède deux capuchons. Le cas d'un seul capuchon n'est pas possible car la variété comporterait alors un bord : elle ne serait pas compacte. De même, plus de deux capuchons n'est pas non plus un cas possible, car la variété ne serait pas d'un seul tenant. Elle ne serait pas connexe. Dans tous les cas où la courbure est grande partout, si la variété de départ est simplement connexe, ce ne peut être un tore, comme en dimension 2. C'est donc une sphère, à une déformation continue près (nous disons « homéomorphe » à une sphère). Pour prouver la conjecture de Poincaré, on a donc tout intérêt à montrer que le flot conduit à des métriques de grande courbure partout.

Malheureusement, il arrive souvent que des singularités, formes de courbure infinie, n'apparaissent qu'en certains endroits de la variété. Cela arrête le flot de Ricci sur toute la variété riemannienne. C'est là que l'idée de Richard Hamilton, conjuguée aux résultats de Grigori Perelman, devient efficace. La chirurgie peut réparer ce qui semble être un traumatisme. Il suffit de sectionner transversalement chaque cylindre à trois dimensions en son milieu. Grigori Perelman a montré qu'on peut se désintéresser de la partie de grande courbure, sans altérer la variété. Sur le bord du cylindre restant, qui est homéomorphe à une sphère à deux dimensions, on greffe un capuchon standard. Nous obtenons ainsi une nouvelle variété riemannienne à partir de laquelle on peut relancer le flot de Ricci et le poursuivre.

Le fleuron des travaux de Grigori Perelman est alors le théorème qui affirme que l'on peut poursuivre cette procédure sans problème, car, dans un temps fini, il n'y a qu'un nombre fini d'actes de chirurgie, ce que n'avait pas vu Richard Hamilton. Il construit ainsi ce que l'on appelle maintenant « le flot avec chirurgie ». Dans un dernier article, il démontre que ce flot avec chirurgie conduit, en un temps fini, à une grande courbure partout, si l'on part d'un espace compact simplement connexe. Or, comme on l'a vu, une grande courbure partout n'est l'apanage que de la sphère. La conjecture de Poincaré est prouvée.

La réussite de Grigori Perelman va au-delà de ce résultat, puisque ses articles annoncent la preuve de la conjecture de Thurston. Nous connaissons toutes les géométries et savons comment elles s'articulent lorsqu'elles sont présentes sur des parties différentes d'une même variété. La situation en trois dimensions est maintenant la même qu'en deux dimensions. La preuve de la conjecture de Poincaré est obtenue à l'aide d'un raisonnement de topologie élémentaire, en recouvrant l'espace par des cylindres et des capuchons. La

La finesse et la virtuosité technique des arguments de Perelman sont époustouflantes

description de l'évolution ultime de ces métriques est une question passionnante qui reste à traiter. D'autres domaines peuvent être attaqués par la même approche. Une intense activité s'est d'ailleurs développée depuis la parution des articles de Grigori Perelman et des textes d'autres mathématiciens sur ses travaux. Depuis peu, les physiciens réinterprètent son approche, et il est certain que des idées vont surgir de cette interaction. La méthode utilisée pour résoudre ces grands problèmes, alliant géométrie et analyse, n'est ni totalement nouvelle ni inattendue. ■

(1) G. Perelman, www.arXiv.org/abs/math.DG/0211159, 2002 ; G. Perelman, www.arXiv.org/abs/math.DG/0303109, 2003 ; G. Perelman, www.arXiv.org/abs/math.DG/0307245, 2003.

(2) S. Smale, *Annals of Mathematics*, 74, 391, 1961.

(3) M. H. Freedman, *J. Diff. Geom.*, 17, 357, 1982.

(4) W. Thurston, *Bull. Amer. Math. Soc.*, 6, 357, 1982.

(5) R. Hamilton, *J. Diff. Geom.*, 17, 255, 1982.

Et aussi...

Le Web tisse sa toile

1989 Le 12 mars 1989, au Cern, le Britannique Tim Berners-Lee et le Belge Robert Cailliau lancent le « World Wide Web », surnommé la Toile, un système hypertexte fonctionnant sur Internet, réseau informatique mondial qui s'est progressivement développé dans le courant des années 1990. Il compte des milliers de pages en langage informatique HTML, mélangeant textes, images et liens hypertexte. On accède à ces pages par leurs adresses URL (un format de nommage universel) et un protocole de communication client-serveur



appelé http (pour Hypertext Transfer Protocol). Pensé comme un environnement neutre capable de servir les intérêts de tous, de l'individu aux plus grandes entreprises et aux États, le Web ambitionne de devenir un formidable outil d'ouverture culturelle.

Pour s'y retrouver dans cette masse d'informations – 800 millions de documents avant la fin de la décennie 1990 –, des outils d'aide à la navigation, comme les annuaires et les moteurs de recherche, sont développés. Dans le courant de la décennie 2000, on appellera Web 2.0 une évolution technologique majeure qui favorise l'interactivité et le multimédia. ■

Retentissante intelligence artificielle

2012 En 2012, l'équipe de Geoffrey Hinton, de l'université de Toronto, fait forte impression lors d'une compétition annuelle de tests d'algorithmes pour la reconnaissance des images. Son système, AlexNet, est le seul à utiliser des « réseaux de neurones profonds ». Il s'agit d'une classe d'algorithmes dits « d'apprentissage », dont l'architecture est inspirée des neurones de notre cortex. Ces réseaux sont capables d'apprendre à classer des images, à reconnaître des voix, à traduire des textes en s'entraînant sur de grandes bases de données numériques. Le succès de ces algorithmes s'appuie sur la concomitance de deux phénomènes : l'explosion des capacités de calculs parallèles, avec l'apparition des processeurs graphiques (GPU), et l'augmentation exponentielle du nombre de données produites chaque jour.

L'apprentissage automatique est pourtant né bien plus tôt. Dès 1957, Frank Rosenblatt, de l'université Cornell, aux États-Unis, invente le perceptron, un neurone artificiel capable d'ajuster la valeur de ses poids synaptiques grâce à une règle d'apprentissage simple. Mais il faudra attendre le début des années 1990 pour voir l'idée ressurgir avec l'invention, par le Français Yann LeCun, d'un algorithme d'apprentissage baptisé « error back-propagation ». En 1994, ce dernier utilise cette méthode sur un réseau de neurones baptisé LeNet, capable de reconnaître automatiquement des caractères manuscrits. Ses travaux donnent lieu à une technologie de lecture automatique des chèques utilisée dans de nombreuses banques américaines. Depuis, ces algorithmes sont partout et font l'objet d'investissements massifs. ■



▲ Yann LeCun a inventé un algorithme de reconnaissance des caractères manuscrits.

L'INCONTOURNABLE
RENDEZ-VOUS 2020

LES TRÉSORS DE L'ÉGYPTE

historia.fr **Historia**

CROISIÈRE SUR LE NIL

Nous irons à la découverte du Caire avec ses incontournables pyramides et son sphinx majestueux, ainsi que le Grand Egyptian Museum qui ouvrira ses portes à l'automne 2020.

Les sites de Karnak et Luxor, le temple de Deir el Bahari, l'exceptionnelle tombe de Sethi Ier feront partie de notre rendez-vous incontournable avec l'Histoire, sans oublier ce joyau historique incontournable, la tombe de la reine Nefertari.

9 JOURS / 8 NUITS
DU 04 AU 12 NOV. 2020
À BORD DU
BLUE SHADOW 5* LUXE

À PARTIR DE
2 990 €/PERSONNE
Au départ de Paris - En tout inclus



AVEC LA PARTICIPATION
EXCEPTIONNELLE DE
NOTRE INVITÉ

Historia



**Claudine
Le Tourneur
d'Ison**
Égyptologue.

- LE TOUT COMPRIS SÉRÉNITÉ BLEU VOYAGES**
- LE VOL RÉGULIER EGYPTAIR
 - LE BLUE SHADOW 5* LUXE, BATEAU RÉSERVÉ EN EXCLUSIVITÉ POUR HISTORIA
 - LA PENSION COMPLÈTE AVEC EAUX MINÉRALES, CAFÉ ET THÉ INCLUS
 - LES HÔTELS 5* AU CAIRE ET À LOUXOR
 - VOS CONFÉRENCIÈRES
 - LES GUIDES ÉGYPTOLOGUES FRANCOPHONES
 - LA VISITE DU NOUVEAU MUSÉE DU CAIRE
 - LES VISITES COMPRIS DE LA TOMBE DE NEFERTARI ET DE SETI I^{ER}
 - L'EXCURSION À ABOU SIMBEL INCLUSE
 - LE VISA ÉGYPTIEN INCLUS

**RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS
BLEU VOYAGES**
213 rue de Gerland - Bat 2 - 69007 LYON
TÉL. 04 72 76 75 66
www.historia2020.fr

Selectour  **Bleu Voyages**

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.



mgen[★]

GRUPE **vyv**

MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.

**J'AI
CHOISI
MGEN**

MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE

Martin Fourcade et 4 millions de personnes ont choisi MGEN pour la confiance, la solidarité, l'accès aux soins de qualité et le haut niveau de prévoyance.

www.antigelagency - 01410 - Mai 2018 - © Hervé THOUROUDE - Ce document est non contractuel

MARTIN FOURCADE
CHAMPION DU MONDE &
CHAMPION OLYMPIQUE
DE BIATHLON

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, n°775 685 399, MGEN Vie, n°441 922 002, MGEN Filia, n°440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du code de la Mutualité - MGEN Action sanitaire et sociale, n°441 921 913, MGEN Centres de santé, n°477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du code de la Mutualité.