



SCIENCE



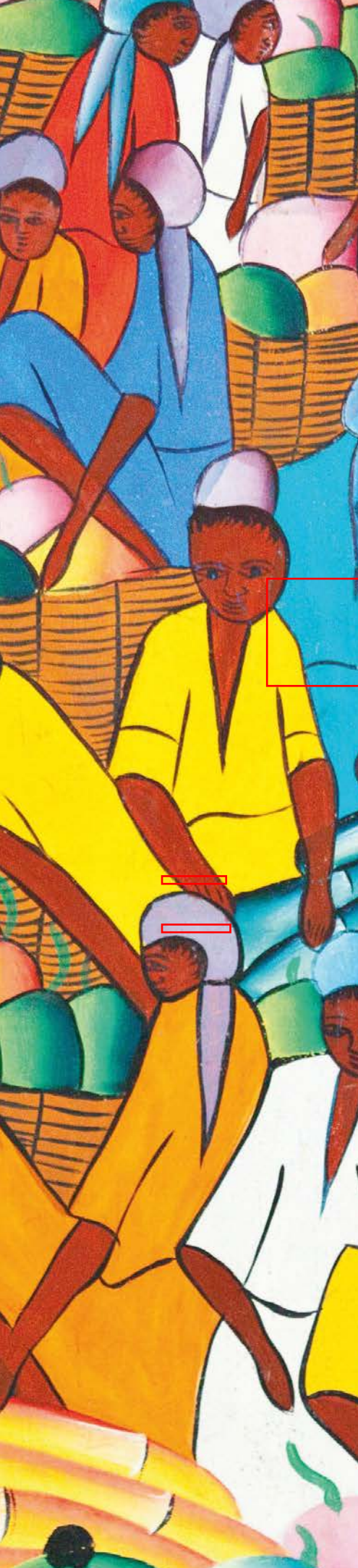
JUIN 2019

Numéro
500

Avec : ÉTIENNE KLEIN ■ CARLO ROVELLI ■
PASCALE SENELLART-MARDON ■
HERVÉ LE GUYADER ■ EDITH HEARD ■
VINCENT COLOT ■ AXEL CLEEREMANS ■
ADÉLAÏDE DE HEERING ■ LIONEL NACCACHE

Quantique Évolution Inconscient

Le renouveau
des grandes
théories



75 ANS
DE RECHERCHE AU SUD

224 pages, 20 €



www.ird.fr

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

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

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Patrick Cœur

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Gustavo Alcuni, Maud Bruguère, Eric Buffetaut,
Pauline Colinet, François-Xavier Coudert, Philippe Lopez,
Christophe Risacher, Jérôme Sueur

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

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

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements -

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

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

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

E
DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

TROIS COUPS DE PROJECTEUR

Les chiffres ronds ont une vertu, celle d'être plus immédiatement accessibles à la conscience que les autres nombres, d'où leur place dans les célébrations. *Pour la Science* profite ainsi de son 500^e numéro pour faire une pause dans le maelström du flot de découvertes et donner un coup de projecteur sur trois des grandes théories qui marquent la science moderne: la théorie quantique, celle de l'évolution et celle de l'inconscient.

Comme le montrent les trois dossiers que nous vous proposons, ces domaines connaissent depuis plusieurs décennies de passionnantes... évolutions. Par exemple, du côté de la physique quantique, les réflexions sur les problèmes d'interprétation se sont renouvelées tout en faisant apparaître des liens avec la quête d'une théorie quantique de la gravitation. Du côté de la théorie de l'évolution, les mécanismes de modification des espèces se précisent et se révèlent d'une richesse et complexité inattendues, notamment avec ce qu'on appelle l'épigénétique. Du côté de l'inconscient, enfin, les idées freudiennes s'effacent peu à peu devant les découvertes de la psychologie expérimentale et des neurosciences, lesquelles esquissent une théorie bien différente du fonctionnement de l'esprit humain.

Quantique, évolution, inconscient, ces mots clés exercent une forte attraction. Pas toujours pour le meilleur. Des charlatans accolent l'adjectif « quantique » à leurs élocutions pour leur donner un vernis de science et de mystère. Des pourfendeurs de la théorie de l'évolution l'attaquent avec incompétence ou malhonnêteté intellectuelle pour des raisons religieuses. Et des psychothérapeutes improvisés invoquent l'inconscient pour lui faire dire n'importe quoi... On peut s'en désoler; mais n'est-ce pas aussi une preuve supplémentaire que les trois théories touchent à des choses essentielles? ■

Nous avons eu la tristesse d'apprendre le décès, le 19 avril, de Marie-Claude Brossollet, qui a dirigé les éditions Belin de 1994 à 2008 et le groupe *Pour la Science* de 2003 à 2010. Toute l'équipe de *Pour la Science* adresse ses sincères condoléances à sa famille et à ses proches.

SOMMAIRE

N° 500 /
Juin 2019

ACTUALITÉS

P.6

ECHOS DES LABOS

- Un témoignage géologique des derniers instants des dinosaures
- Biodiversité mondiale: un rapport accablant
- Du nouveau sur l'origine des mitochondries
- Multiplier plus vite
- La molécule HeH^+ enfin vue dans l'espace
- Le cerveau à l'échelle de la cellule, en 3D et en couleurs
- Recette pour MOF amorphe
- La première vraie image d'un trou noir
- Deux nouvelles pièces du puzzle dénisovien

P.16

LES LIVRES DU MOIS

P.18

AGENDA

P.20

HOMO SAPIENS INFORMATICS

La vertu des masques
Gilles Dowek

P.22

QUESTIONS DE CONFIANCE

L'État ubérisé et l'intérêt général
Virginie Tournay



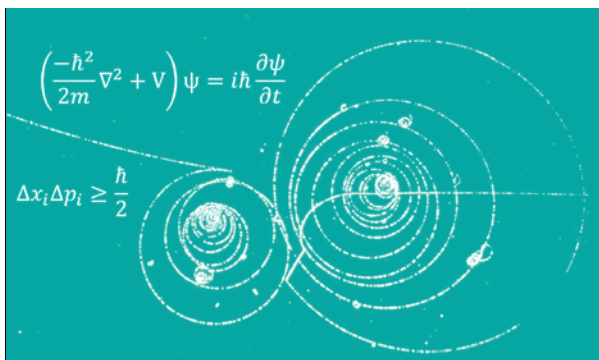
En couverture :
© Bildagentur Zoonar GmbH /
shutterstock.com

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

LE RENOUVEAU DES GRANDES THÉORIES

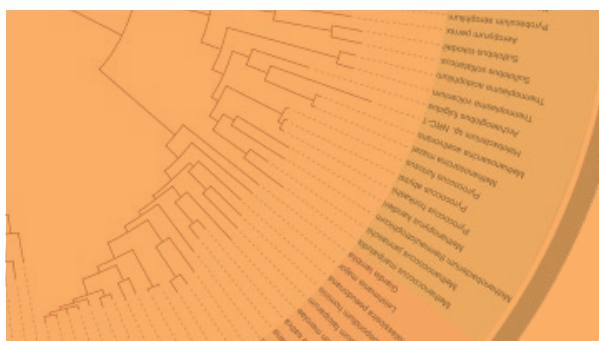
P.25 PHYSIQUE

LA THÉORIE QUANTIQUE DE DEMAIN



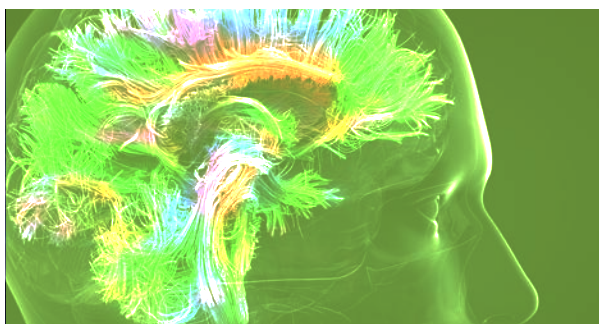
P.45 BIOLOGIE

LE NOUVEAU VISAGE DE LA THÉORIE DE L'ÉVOLUTION



P.65 NEUROSCIENCES

VERS UNE THÉORIE DE L'INCONSCIENT?



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

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

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



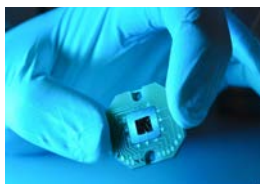
Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



P. 26
**LES NOUVEAUX DÉFIS
DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE**

Étienne Klein et Carlo Rovelli

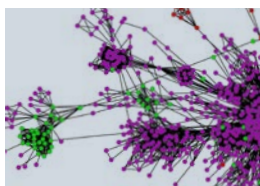
Le problème de la gravitation sera-t-il résolu grâce à une réinterprétation de la théorie quantique?



P. 38
**« L'ORDINATEUR QUANTIQUE
DEVIENT UN ENJEU POLITIQUE »**

Entretien avec Pascale Senellart-Mardon

Le rêve d'ordinateurs opérant sur des bits quantiques et non classiques se concrétise... à petits pas!



P. 46
**LES MUTATIONS
DE LA THÉORIE DE L'ÉVOLUTION**

Hervé Le Guyader

La théorie de l'évolution ne cesse... d'évoluer depuis sa première formulation par Darwin, en 1859.



P. 58
**« L'ÉPIGÉNÉTIQUE EST
UN MODULATEUR CLÉ DE L'ÉVOLUTION »**

Entretien avec Edith Heard et Vincent Colot

En régulant des éléments mobiles du génome, l'épigénétique contrôle un vaste réservoir de variations.



P. 66
**L'INCONSCIENT DOIT
ENCORE FAIRE SES PREUVES**

Axel Cleeremans et Adélaïde de Heering

La psychologie expérimentale et les neurosciences redéfinissent l'inconscient et son rôle.



P. 74
OBSERVER LA CONSCIENCE

Lionel Naccache

Grâce notamment à l'imagerie cérébrale, on comprend mieux aujourd'hui ce qui caractérise l'état conscient.

RENDEZ-VOUS

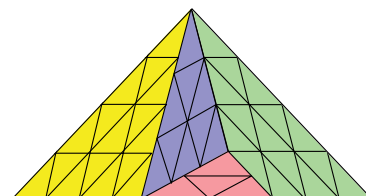
P. 82

LOGIQUE & CALCUL

**DÉCOUPER
UN TRIANGLE
EN TRIANGLES**

Jean-Paul Delahaye

Est-il possible de découper un triangle en un nombre donné de morceaux triangulaires plus petits? Aujourd'hui encore, on découvre de nouveaux et remarquables résultats sur ce type de questions.



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Du noir presque parfait

*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

P. 92

**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**

**Du pot au lait
à la mucoviscidose**

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

**Des aliments plus
ou moins mi-cuits**

Hervé This

P. 98

A PICORER

A

CTUALITÉS

P. 6 Echos des labos
P. 16 Livres du mois
P. 18 Agenda
P. 20 Homo sapiens informaticus
P. 22 Questions de confiance

PALEONTOLOGIE

UN TÉMOIGNAGE GÉOLOGIQUE DES DERNIERS INSTANTS DES DINOSAURES



Sur le site de Tanis, en Amérique du Nord, une couche de 1,3 mètre d'épaisseur et âgée de 66 millions d'années renferme les restes de nombreux poissons et de plantes enchevêtrés, associés à des traces géologiques de l'impact d'une météorite.

On a découvert le témoignage fossile d'une hécatombe qui s'est produite quelques minutes après l'impact de la météorite ayant mis fin au règne des dinosaures.

La disparition des dinosaures à la fin du Crétacé est attribuée à la chute d'un astéroïde au Mexique. Mais que s'est-il passé exactement ce jour-là ? Pour l'essentiel, nous l'ignorons. Cependant, Robert DePalma, de l'université du Kansas, a étudié une extraordinaire capsule temporelle contenant le témoignage précis d'une mort en masse apparemment liée à l'impact, qui apporte quelques précisions sur les suites immédiates de la catastrophe.

La fin du Crétacé s'est produite il y a quelque 66 millions d'années, quand un

astéroïde d'environ 10 kilomètres de diamètre frappa la Terre près de l'emplacement du village actuel de Chicxulub. L'énergie libérée par le choc était équivalente à celle de quelque 100 milliards de bombes de Hiroshima, ce qui aurait eu de grandes conséquences écologiques, notamment l'extinction des dinosaures.

Nommé Tanis, le gisement paléontologique étudié par Robert DePalma se trouve dans le Dakota du Nord, à 3000 kilomètres du point d'impact. Il s'agit d'une couche de 1,3 mètre d'épaisseur mêlant des sédiments à un amas de fossiles de plantes et d'animaux très bien conservés. Les bouches

ouvertes des poissons d'eau douce fossilisés (des poissons-spatule et des esturgeons) et les signes de tétanie due à l'asphyxie des animaux prouvent que c'est bien le contenu d'un fleuve qui a brusquement été rejeté en vrac sur la rive végétalisée d'un méandre du paléofleuve Tanis. Coulant vers l'est, ce dernier se jetait dans la mer intérieure nord-américaine présente à l'époque. Le dépôt fait donc penser au genre de chaos sédimentaire laissé par les tsunamis. Pour autant, son profil granulométrique oblige à le subdiviser en deux strates superposées. Il y a donc eu deux déferlements successifs.

L'âge du dépôt suggère fortement une fossilisation rapide liée à l'impact de Chicxulub : depuis le début de l'étude de Tanis, pas moins de 40 datations à l'argon (fondées sur le rapport $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) se sont

accumulées, attribuant aux sédiments un âge moyen de $65,76 \pm 0,15$ millions d'années, ce qui correspond bien à l'extrême fin du Crétacé. En outre – et comme il se doit si Tanis date vraiment de la toute fin du Crétacé – ses strates sont immédiatement recouvertes par la même fine couche d'argile riche en iridium (élément très présent dans les météorites) qui, retrouvée partout sur la planète, est identifiée comme la signature chimique de la météorite.

Logiquement, Robert DePalma a donc d'abord pensé avoir affaire au dépôt formé par le déferlement dans la vallée de l'énorme tsunami dû à la météorite. Le calcul montre toutefois que ce n'est pas possible: le tsunami aurait mis plus de 18 heures pour arriver à Tanis, alors que deux observations prouvent que l'inondation violente de Tanis s'est produite dans l'heure qui a suivi l'impact. La première est que les ouïes des poissons et la boue de Tanis sont saturées de petites billes de quartz choqué, des éjectas typiques d'un impact météoritique et qui, d'après les calculs, ont plu sur Tanis entre 13 minutes et 2 heures après le choc. Deuxième observation: des impacts de tectites, des projectiles de verre aux formes arrondies produits par l'éjection puis la solidification en vol des roches fondues par l'impact, constellent les strates de Tanis.

Dès lors, d'où viennent les deux vagues qui ont déferlé à Tanis? Selon les chercheurs, le plus vraisemblable est qu'elles ont été induites par les oscillations d'un bassin attenant au fleuve Tanis (son embouchure?), provoquées par les très puissantes ondes sismiques associées à l'impact. Or le calcul montre que ces ondes ont atteint Tanis en quelques minutes.

Ainsi, Tanis témoigne bien de ce qui s'est produit dans l'heure qui a suivi l'impact de Chicxulub. Or Robert DePalma y a découvert un os iliaque de dinosaure herbivore, et il a aussi confié à Douglas Preston, du magazine *The New Yorker*, avoir trouvé une plume de dinosaure présumée et « des dents, des os cassés et des restes d'éclosion de presque tous les groupes de dinosaures connus dans la région, ainsi que des restes de ptérosaure ». Ces découvertes, non encore publiées, laissent penser que les dinosaures étaient toujours là le jour où la météorite de Chicxulub est tombée. ■

FRANÇOIS SAVATIER

R. DePalma et al., *PNAS*, en ligne le 1^{er} avril 2019

Biodiversité mondiale : un rapport accablant

L'IPBES, la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques, créée sous l'égide de l'ONU en 2012, vient de tenir sa 7^e conférence plénière à Paris. Elle a rendu public son rapport sur la biodiversité mondiale le 6 mai. Les explications de l'écologue Sandra Lavorel, contributrice à l'IPBES à titre d'experte.



Propos recueillis par MAURICE MASHAAL

SANDRA LAVOREL
directrice de recherche
au Laboratoire
d'écologie alpine,
à Grenoble

Quels étaient les objectifs de ce rapport ? Comment a-t-il été établi ?

Il s'agissait d'établir une synthèse à l'échelle mondiale de l'état actuel de la biodiversité, des écosystèmes et des services que ceux-ci rendent, en indiquant les tendances passées et attendues ; de passer en revue les divers instruments, réglementaires et autres, qui sont susceptibles d'améliorer la situation ; et de proposer aux décideurs (politiques, industriels, etc.) des pistes d'action. Cette synthèse est le fruit de plusieurs grandes évaluations, notamment régionales comme celle à laquelle j'ai participé et qui portait sur l'Europe et l'Asie centrale. Elle a mobilisé plus de 450 experts de disciplines diverses pendant environ trois ans. C'est le premier rapport global sur la biodiversité depuis l'« Évaluation des écosystèmes pour le millénaire » de 2005, et le premier qui soit intergouvernemental, soumis à l'approbation des représentants des 132 pays membres de l'IPBES.

En termes de constat, quels sont les points saillants ?

Les tendances au déclin de la biodiversité et à la dégradation des écosystèmes, à un rythme sans précédent, sont malheureusement confirmées. Le rapport contient à cet égard beaucoup de chiffres éloquentes. Par exemple, en Europe et Asie centrale, 28 % des espèces évaluées sont menacées d'extinction, ce chiffre montant à 37 % pour les poissons d'eau douce, à 33 % pour les plantes vasculaires. Autre exemple, on estime que 75 % des milieux terrestres, 40 % de l'environnement marin et la moitié des cours d'eau ont été gravement altérés. Les causes de ces évolutions négatives sont d'abord l'utilisation des terres – pour l'agriculture, l'exploitation forestière ou

l'urbanisation – et le prélèvement direct des ressources comme la pêche et la chasse ; il y a ensuite le changement climatique, les pollutions et les espèces invasives. Un autre pan important du rapport est l'évaluation des services écosystémiques, qui tente de quantifier l'impact de la dégradation des écosystèmes sur la production alimentaire, celle du bois, la pollinisation, l'érosion des terres, la qualité des eaux, les valeurs culturelles...

Que préconise le « résumé pour décideurs » du rapport ?

Ce résumé souligne notamment le fait que l'arsenal législatif et réglementaire existant permettrait déjà d'améliorer la situation, à condition qu'il soit correctement appliqué. L'une des recommandations est de modifier les modes de consommation de l'énergie et de l'alimentation, de veiller à ne pas exporter à distance des problèmes, par exemple quand la consommation de bois dans un pays conduit à de la déforestation dans un autre. Une autre piste est de rapprocher les gens de la nature, y compris dans les villes où, par exemple, les surfaces végétalisées permettent de réguler la température ou d'améliorer l'écoulement des eaux de pluie.

Le combat risque d'être encore plus long et difficile que pour le climat, non ?

En fait, les problèmes de la biodiversité et du climat relèvent souvent d'un même combat de fond, modifier les modèles économiques et les modes de consommation. C'est dans ces synergies entre solutions pour le climat et pour la biodiversité que l'on peut espérer des actions à fort impact. Comme pour le climat, il existe de très nombreuses initiatives locales, et beaucoup de grandes entreprises ont pris conscience de l'importance de la biodiversité et de ses services. Mais tout cela doit être complété et renforcé par des initiatives venant des gouvernements. ■

Rapport disponible sur le site de l'IPBES : www.ipbes.net

ÉVOLUTION

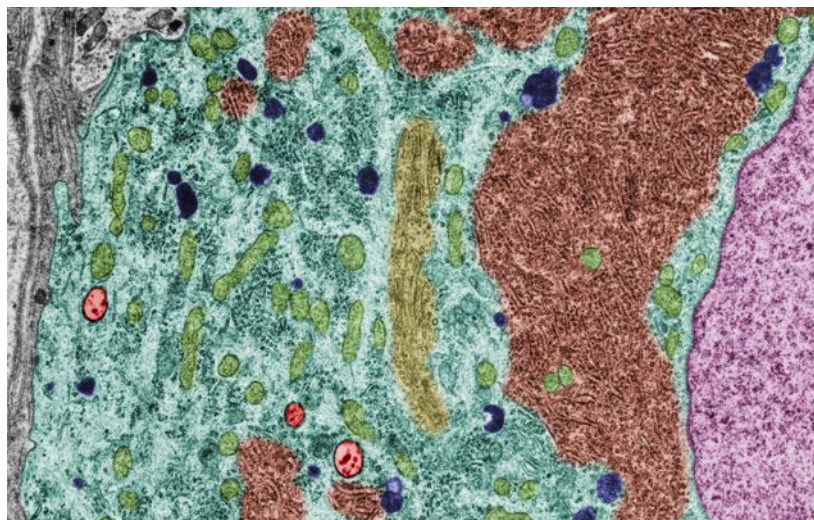
QUAND LA MITOCHONDRIE VIVAIT AUX PORTES D'ASGÅRD

Les mitochondries, les usines à énergie des eucaryotes, seraient des descendantes de bactéries qui se nourrissaient des déchets d'ancêtres des archées d'Asgård.

Quel est le point commun entre animaux, plantes, champignons et protozoaires, des organismes unicellulaires comme les paramécies? Ils forment le groupe des eucaryotes, un des trois grands domaines de l'arbre du vivant aux côtés des bactéries et des archées. Si l'on connaît nombre de ramifications de cette branche, les conditions de sa naissance restent mystérieuses. Les cellules eucaryotes ont plusieurs caractéristiques propres, notamment un noyau et des mitochondries, petits organites qui fournissent de l'énergie à la cellule. Or l'origine de ces deux compartiments reste énigmatique. Toutefois, à partir d'études génomiques, Anja Pang, de l'université d'Uppsala, en Suède, et ses collègues viennent de suggérer un nouveau scénario concernant la mitochondrie, à contre-courant de celui communément proposé.

Aujourd'hui, les biologistes s'accordent à dire que la cellule eucaryote serait le fruit d'une symbiose entre une archée et une bactérie, ce que l'étude ne remet pas en cause. Mais à l'origine de cette symbiose, elle suggère un mécanisme à l'opposé de celui imaginé auparavant. L'équipe s'est intéressée à une branche des archées mise au jour en 2015 dans des sédiments profonds de sources hydrothermales au large de la Norvège: les archées d'Asgård. Ces microorganismes seraient en effet les plus proches parents des eucaryotes: s'ils n'ont ni noyau ni mitochondrie, ils contiendraient des compartiments et des protéines que l'on pensait spécifiques des eucaryotes, tel un cytosquelette. C'est du moins ce qu'ont révélé les études métagénomiques de divers échantillons, car personne n'a encore réussi à isoler un membre de cette famille.

Anja Pang et ses collègues se sont donc aussi penchés sur le génome de ces archées, et plus spécifiquement sur les gènes codant des enzymes impliquées dans le métabolisme – l'ensemble des réactions chimiques par lesquelles l'organisme produit les composants et l'énergie dont il a besoin pour vivre. Leur idée était de comparer ces gènes chez les différents types d'archées afin de reconstituer leur histoire évolutive. Ils se sont ainsi aperçus que, d'une famille à l'autre, les archées d'Asgård utilisent des mécanismes différents, mais avec un point commun: ils auraient



Parmi les divers compartiments qui leur sont propres, les cellules eucaryotes présentent un noyau (ici en rose dans un neurone observé par microscopie électronique) et des mitochondries (en vert).

tous pour substrat de la matière organique et rejetteraient à des degrés variés de l'hydrogène, des électrons et divers autres composés réduits. En d'autres termes, les archées d'Asgård seraient avant tout hétérotrophes: elles auraient besoin d'un apport extérieur de matière organique pour produire leur énergie et leurs composants.

De leur côté, les mitochondries ressemblent à une famille de bactéries, les alphaprotéobactéries, dont plusieurs membres produisent des enzymes spécialisées dans le métabolisme de l'hydrogène. D'où le nouveau modèle proposé: des archées ancestrales vivaient en consommant certaines molécules organiques environnantes comme des acides gras, des alcanes ou des composés aromatiques. Ce faisant, elles rejetaient de l'hydrogène et d'autres produits, que des alphaprotéobactéries ancestrales utilisaient à leur tour. Une symbiose se serait ainsi établie et, par coévolution, serait devenue une endosymbiose, sans doute scellée *a posteriori* par des gènes venus d'autres bactéries. Or, dans le modèle en vogue jusqu'à présent, qui ne prenait pas en compte ces considérations métaboliques, la bactérie était la pourvoyeuse d'hydrogène de l'archée... Reste à comprendre d'où vient le noyau. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

A. Spang *et al.*, *Nat. Microbiol.*, en ligne le 1^{er} avril 2019

EXPLOSION DE BÉTON
EN TEMPS RÉEL

Plusieurs incendies nous ont appris que les structures en béton des tunnels explosent à température trop élevée. Une équipe de l'université de Grenoble et de l'institut Laue-Langevin a observé le phénomène en temps réel par tomographie neutronique et confirmé ce que l'on pensait : c'est parce que l'eau contenue dans les minuscules pores du béton devient de la vapeur à très haute température que naissent des pressions excessives pour le béton.

LA DUALITÉ...
ONDE-ANTIPARTICULE

On l'avait déjà fait avec des électrons : voilà qu'une expérience effectuée à l'Institut polytechnique de Milan vient de montrer que leurs antiparticules, les positrons, ont aussi une nature ondulatoire (ce que l'on savait déjà indirectement). Les chercheurs ont envoyé un faisceau de positrons à travers deux fentes voisines parallèles. Cela a produit sur l'écran une figure d'interférence, au lieu des images des fentes qui seraient apparues si les positrons se comportaient comme de simples corpuscules. L'antimatière n'échappe pas à la dualité onde-corpuscule !

L'ORIGINE
DES LANGUES
SINO-TIBÉTAINES

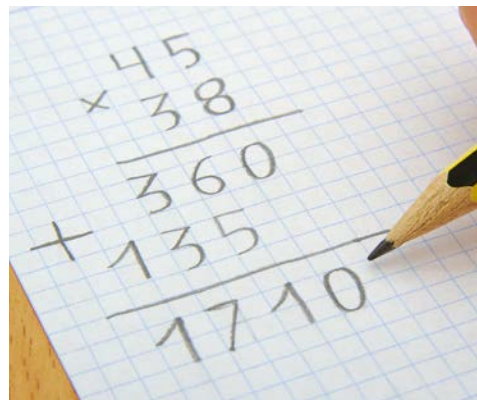
Au moins 1,4 milliard d'humains parlent une langue sino-tibétaine, mais l'origine de ce groupe linguistique reste incertaine. Avec des collègues, Laurent Sagart, du Centre des recherches linguistiques sur l'Asie orientale, à Paris, a identifié dans les quelque 500 langues sino-tibétaines des ensembles de mots apparentés, puis s'en est servi pour construire l'arbre de parenté du groupe. Et en conclut qu'il remonterait aux langues de paysans qui, il y a quelque 7 200 ans, cultivaient le mil dans le nord de la Chine.

MULTIPLIER
PLUS VITE

Les écoliers apprennent à multiplier les nombres entiers selon une méthode qui a prouvé son efficacité depuis son développement dans l'Antiquité. Elle consiste à prendre chaque chiffre du premier nombre et à le multiplier avec chacun du second nombre, puis à additionner ces résultats intermédiaires. Si chaque nombre contient n chiffres, le nombre total de multiplications à effectuer augmente comme le carré du nombre de chiffres, n^2 . Ainsi, pour multiplier deux nombres de un milliard de chiffres chacun, il faut réaliser un milliard de milliards d'opérations, soit quelque 30 ans de calculs sur un ordinateur réalisant un milliard d'opérations par seconde ! Peut-on faire mieux ?

À partir des années 1960, des mathématiciens ont montré qu'en isolant des blocs de chiffres dans les nombres à multiplier et en réalisant des opérations d'addition et de soustraction sur ces blocs, il était possible de s'économiser certaines multiplications. Or les additions et les soustractions sont des opérations plus simples, et donc plus rapides à effectuer, pour un ordinateur. Puis, dès les années 1970, l'utilisation de la transformation de Fourier rapide a encore amélioré les algorithmes pour les grands nombres.

En 1971, Arnold Schönhage et Volker Strassen, de l'université de Constance, en



La méthode classique de multiplication n'est pas la plus efficace lorsque les nombres sont très grands.

Allemagne, ont alors conjecturé qu'il devait être possible de trouver une méthode dont le nombre d'opérations évoluerait en $n \log(n)$. Joris van der Hoeven, de l'École polytechnique, à Palaiseau, et David Harvey, de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, viennent de trouver un tel algorithme. Pour ce faire, ils s'appuient sur une version multidimensionnelle de la transformation de Fourier rapide.

Si ce résultat a une grande importance théorique, l'algorithme reste à optimiser car il ne devient performant, pour l'instant, que pour des nombres comprenant plus de chiffres qu'il n'y a d'atomes dans l'Univers observable ! ■

SEAN BAILLY

D. Harvey et J. van der Hoeven, en ligne sur HAL, 12 avril 2019, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02070778>

ASTROCHIMIE

HeH⁺, ENFIN VUE
DANS L'ESPACE

L'hydrure d'hélium (HeH⁺) serait la première molécule formée dans l'Univers primordial. On l'avait observée pour la première fois en laboratoire en 1925, mais jamais dans l'espace. Pourtant, dans les années 1970, des chercheurs avaient suggéré que les conditions régnant dans les nébuleuses planétaires étaient favorables à sa formation. Sa détection était cependant difficile, car sa signature spectrale dans le rayonnement des nébuleuses se confond avec celle du radical CH.

Pour leur étude, Rolf Güsten, de l'institut Max-Planck de radioastronomie, à Bonn, en Allemagne, et ses collègues ont utilisé l'Observatoire stratosphérique d'astronomie infrarouge (*Sofia*), installé à bord d'un Boeing 747. L'avion évolue à plus de 12 000 mètres d'altitude pour réduire au maximum les perturbations liées à la



La nébuleuse NGC 7027 contient de l'hydrure d'hélium.

présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Les chercheurs ont alors associé le télescope de trois mètres de diamètre de l'observatoire volant à un spectromètre à haute résolution pour capter spécifiquement la longueur d'onde correspondant à HeH⁺, et ont confirmé sa présence dans la nébuleuse NGC 7027. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

R. Güsten et al., *Nature*, vol. 568, pp. 357-359, 2019

EN IMAGE

LE CERVEAU À L'ÉCHELLE DE LA CELLULE, EN 3D ET EN COULEURS

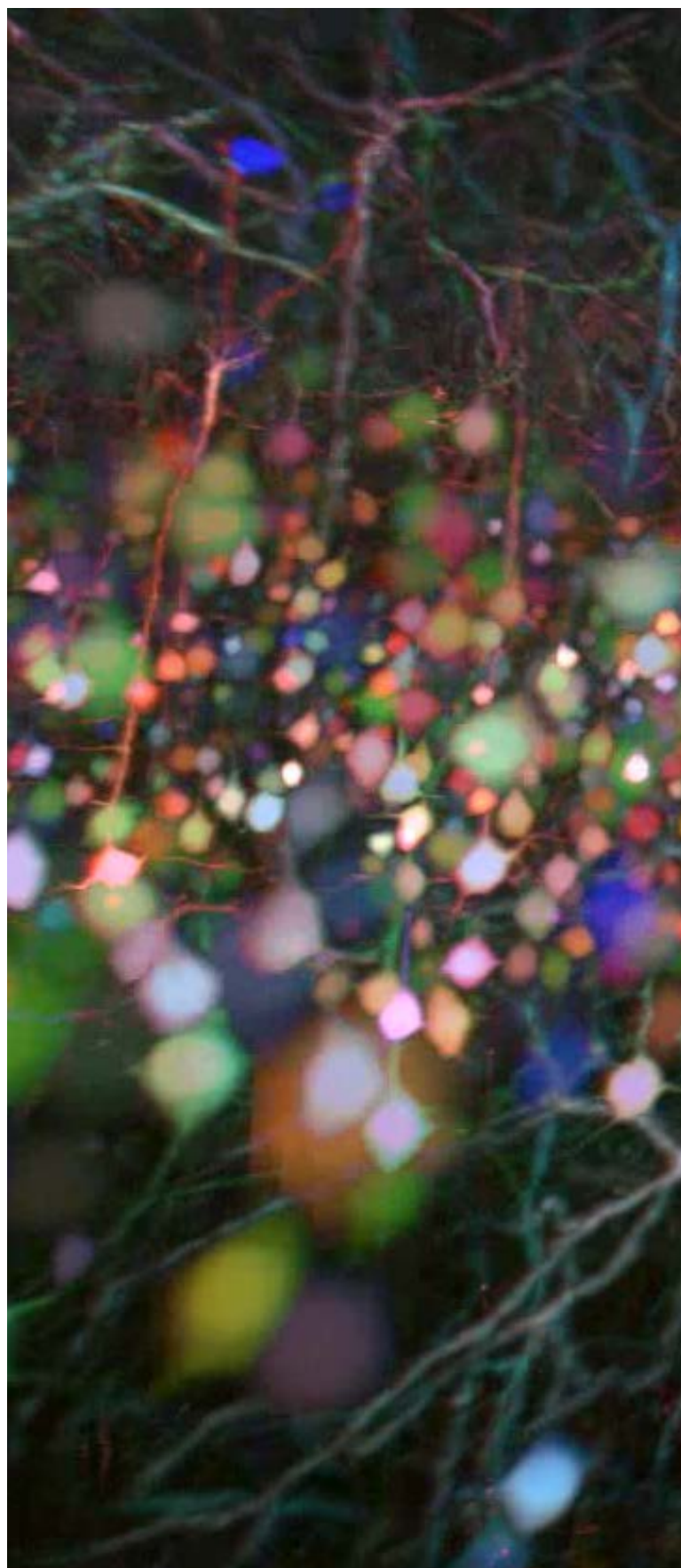
Visiter virtuellement des régions entières du cerveau, voire le cerveau entier, à l'échelle de la cellule et avec une résolution de l'ordre du micromètre: c'est ce que permet le nouveau microscope ChroMS (*chromatic multiphoton serial microscope*) mis au point par les équipes d'Emmanuel Beaurepaire, au Laboratoire d'optique et biosciences de l'École polytechnique, à Palaiseau, et de Jean Livet, à l'Institut de la vision, à Paris.

Avec les techniques de microscopie à fluorescence disponibles, il n'était pas possible de visualiser de grands volumes de tissu en couleurs et à haute résolution. Pour y parvenir, les chercheurs de l'Institut de la vision ont développé chez la souris des méthodes transgéniques pour distribuer dans les cellules d'un tissu des marqueurs génétiques multicolores, dérivés de protéines fluorescentes de méduses ou de coraux. Et pour exploiter cette technique, l'équipe du Laboratoire d'optique et biosciences a mis au point un dispositif qui combine les stimulations de deux lasers infrarouges à impulsions ultrabrèves. On parle d'excitation biphotonique multicolore par «mélange de fréquences».

Les chercheurs obtiennent alors des images en couleurs de résolution micrométrique sur une profondeur d'un demi-millimètre environ. Pour augmenter encore cette profondeur, l'approche ChroMS associe au microscope un microtome, appareil qui découpe de façon automatisée de minces tranches du tissu *ex vivo*. «Après chaque coupe, le dispositif procède à une nouvelle acquisition d'images. On réalise ainsi une reconstruction intégrale et tridimensionnelle du tissu, que l'on doit ensuite annoter et analyser. Cette étape prend plusieurs jours, car l'image est constituée de dizaines, voire de centaines de milliards de voxels, l'équivalent des pixels en 3D», détaille Jean Livet. L'une des premières applications (*ci-contre*) a permis d'obtenir une vue tridimensionnelle en couleurs des neurones dans le cortex d'une souris. ■

NOËLLE GUILLON

L. Abdeladim *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 1662, 2019





© Laboratoire d'optique et de sciences de la vision / Ecole polytechnique / CNRS / Inserm / Sorbonne Université - Adapté de Abdelhakim et al. / Nat. Comm. 2019

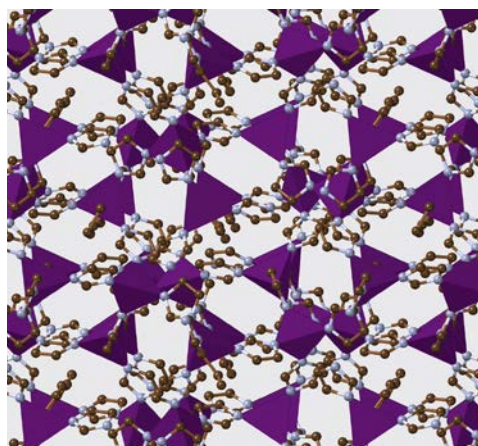
CHIMIE

RECETTE POUR MOF AMORPHE

Les réseaux métalloorganiques (ou MOF en anglais), constitués d'ions métalliques reliés par des molécules organiques, ont une structure tridimensionnelle poreuse qui leur confère de nombreuses propriétés physico-chimiques intéressantes. La plupart de ces composés sont obtenus sous forme cristalline. Or il serait intéressant d'en produire en phase amorphe: cela aurait l'avantage, entre autres, de les rendre plus modelables et moins cassants.

La voie de synthèse la plus courante pour des matériaux solides amorphes consiste à faire fondre des solides cristallins en les chauffant, puis à les refroidir brutalement afin de les figer dans un état microscopique désorganisé, caractéristique des phases amorphes. Dans le cas des MOF, les chercheurs se heurtaient à un problème: les faire fondre requiert des températures élevées, proches de celles qui induisent leur dégradation définitive.

Remo Widmer, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont découvert qu'en augmentant la pression, ils diminuent les températures de fusion de deux MOF, le ZIF-4 et le ZIF-62. Pour le ZIF-62, par exemple, la température de fusion à la pression de 2 gigapascals (20000 fois la pression atmosphérique normale) est diminuée de 70°C environ, passant de 430°C à



Représentation du ZIF-62 sous sa forme cristalline. Des chercheurs ont développé une méthode pour l'obtenir en phase amorphe.

pression ambiante à «seulement» 360°C. Ces conditions expérimentales, accessibles à l'échelle industrielle, devraient faciliter la réalisation de «verres» de MOF.

Par ailleurs, les scientifiques ont observé qu'en choisissant judicieusement la température et la pression, ce sont en réalité deux phases solides amorphes distinctes, aux propriétés physiques différentes, qu'ils produisent pour chaque MOF, ouvrant la voie à une grande modularité dans la fabrication de ce nouveau type de matériaux. ■

MARTIN TIANO

R. N. Widmer et al., *Nature Materials*, vol. 18, pp. 370-376, 2019

MICROBIOLOGIE

BACTÉRIES SOUS LA MER MORTE

La mer Morte, dont les eaux sont plus de dix fois plus salées que celles des océans, ne mérite pas tout à fait son nom puisque ce n'est pas une mer et que certains micro-organismes y vivent. Et qu'en est-il dans les sédiments accumulés sous ce lac, milieu souterrain encore plus extrême et hostile à la vie? Quatre chercheurs de l'université de Genève et du Laboratoire de géologie de Lyon viennent d'y découvrir des traces montrant que des bactéries y vivent ou y vivaient.

Daniel Ariztegui, Camille Thomas et leurs collègues lyonnais Vincent Grossi et Ingrid Antheaume ont analysé des sédiments extraits jusqu'à 243 mètres sous le fond du lac par une plateforme de forage scientifique. Ils y ont trouvé des cires d'esters isopréniques, molécules qui ne peuvent être produites que par des bactéries à



La plateforme scientifique utilisée pour extraire des sédiments à plusieurs centaines de mètres sous le fond de la mer Morte.

partir des membranes cellulaires d'archées, un type de microorganismes mieux adaptés aux milieux extrêmes que les bactéries. Une découverte qui montre que des bactéries peuvent survivre dans ces sédiments grâce au recyclage de matières organiques provenant des archées. ■

M. M.

C. Thomas et al., *Geology*, en ligne le 22 mars 2019

EN BREF

MICROPLASTIQUES DANS LE VENT

Steve Allen, de l'Ecolab, à Toulouse, et ses collègues ont étudié la dynamique des microparticules de plastique dans les Pyrénées. Ils ont montré que dans des régions même isolées, la pluie et la neige apportaient en moyenne, par mètre carré et par jour, plus de 365 microparticules de moins de 5 millimètres, une valeur comparable à celle des grandes métropoles comme Paris. Les chercheurs ont estimé que ces polluants voyagent au moins sur une centaine de kilomètres grâce au vent.

UN TYRANNOSAURE INTERMÉDIAIRE

Durant la fin du Crétacé supérieur, il y a entre 80 et 66 millions d'années, des dinosaures géants (tyrannosaures, cératopsidés, etc.) vivaient en Amérique du Nord. Leur évolution est assez mal connue, car on ne dispose que de peu de fossiles de la période qui a précédé, du fait de changements climatiques et d'une importante montée des eaux. Stirling Nesbitt, de Virginia Tech, et ses collègues ont découvert une nouvelle espèce de tyrannosaure, *Suskityrannus hazelae*, datant de cette période pauvre en fossiles. Celle-ci présente des traits intermédiaires entre les petits tyrannosaures plus anciens et les gigantesques derniers représentants de ce groupe.

TARA : 200 000 VIRUS DANS LES OCÉANS

Gâce aux relevés de l'expédition Tara Océans entre 2009 et 2013, Matthew Sullivan, de l'université d'État de l'Ohio, et ses collègues ont réalisé une étude métagénomique (incluant notamment les océans polaires). Résultat : le nombre d'espèces de virus dans les océans connus passe de 16 000 à près de 200 000. De façon surprenante, l'océan Arctique présente une très grande diversité d'espèces virales.

PHYSIQUE

REBOND DE GOUTTES

Dans un tube rempli d'un mélange d'eau et d'éthanol dont la densité augmente avec la profondeur, Yanshen Li, de l'université de Twente, aux Pays-Bas, et ses collègues ont observé le comportement d'une goutte d'huile (transanéthol). Comme attendu, cette dernière s'enfonce lentement dans le fluide sous l'effet de la gravité. Mais, subitement, lorsqu'elle atteint une certaine profondeur, elle rebondit, et le phénomène se répète.

Les chercheurs expliquent qu'à cause de la variation de densité en éthanol, la tension de surface de la goutte n'est pas uniforme et induit dans celle-ci un flux, dit de Marangoni, qui augmente jusqu'à entraîner la goutte vers le haut. Lorsqu'elle remonte, ce courant de Marangoni diminue et la pesanteur reprend le dessus. Le cycle se répète, mais finit par s'estomper. ■

S. B.

Yanshen Li et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, article 154502, 2019

BIOLOGIE

LES JUMEAUX DE L'ISS

Du 27 mars 2015 au 1^{er} mars 2016, l'astronaute Scott Kelly a vécu à bord de la Station spatiale internationale (ISS) pendant que son frère jumeau, Mark, est resté sur Terre. Francine Garrett-Bakelman, de la faculté de médecine de l'université de Virginie, et ses collègues ont profité de cette situation unique pour étudier l'influence sur l'organisme de l'apesanteur et de la vie dans l'espace, en comparant de nombreuses caractéristiques physiologiques et moléculaires des deux frères.

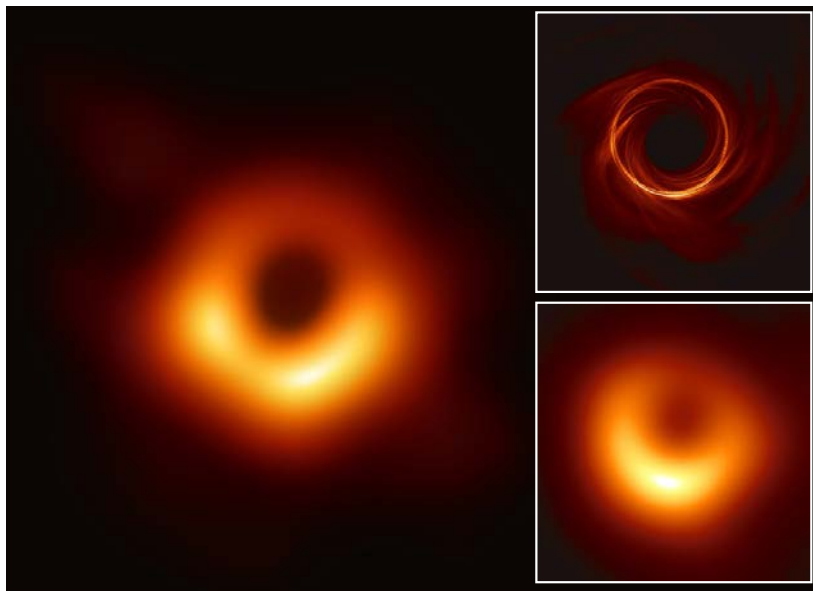
Les chercheurs ont noté que l'organisme de Scott Kelly a été dans un état de stress physiologique permanent sur l'ISS. Ils ont, par exemple, observé des modifications épigénétiques dans ses cellules immunitaires. Plus surprenant, les télomères (les extrémités des chromosomes qui diminuent de taille avec l'âge) se sont rallongés alors que les scientifiques s'attendaient plutôt au contraire du fait du stress. La plupart de ces effets se sont néanmoins résorbés dans les six mois qui ont suivi le retour sur Terre. ■

S. B.

F. E. Garrett-Bakelman et al., *Science*, vol. 364, article eaau8650, 2019

ASTROPHYSIQUE

LA PREMIÈRE VRAIE IMAGE D'UN TROU NOIR



L'image obtenue du trou noir de la galaxie M87 (à gauche) est comparée à l'image théorique (à droite, en haut), et à l'image théorique prenant en compte la résolution du télescope (à droite, en bas). La très bonne correspondance confirme l'efficacité de la relativité générale pour décrire les trous noirs.

Jusqu'à présent, les images de trous noirs dans les articles de *Pour la Science* ou dans des films tels qu'*Interstellar* étaient des vues d'artistes ou des simulations numériques très poussées. Une vraie image existe désormais, celle du trou noir qui se cache au centre de la galaxie M87. Une collaboration internationale d'astrophysiciens et de théoriciens l'a obtenue grâce à un réseau de huit radiotélescopes répartis sur quatre continents et reliés afin de créer un télescope virtuel de la taille de la Terre, l'*Event Horizon Telescope* (ou EHT).

En 1979, Jean-Pierre Luminet, du laboratoire Luth, à Meudon, a déterminé l'aspect qu'aurait le disque de matière qui entoure un trou noir (le disque d'accrétion) et qui émet un rayonnement intense. Mais était-il possible de voir une vraie image de trou noir? À la fin des années 1990, les astrophysiciens ont montré qu'avec un réseau de radiotélescopes répartis sur l'ensemble de notre planète, il serait en principe possible d'atteindre une résolution suffisante pour voir l'ombre du trou noir encerclée par la lumière provenant du disque d'accrétion. Près de vingt ans plus tard, Shepherd Doeleman, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, et ses collègues ont lancé le projet *Event Horizon Telescope*: en 2017, huit observatoires, en France, aux États-Unis, au Mexique, au Chili et en Antarctique, se sont coordonnés pour scruter pendant 65 heures la galaxie M87, distante de 55 millions d'années-lumière. Un énorme travail d'analyse des données et de reconstruction de l'image, mené par plusieurs équipes, a suivi pour finalement révéler l'ombre du trou noir de M87. Le résultat correspond parfaitement à ce que les simulations fondées sur la théorie de la relativité générale laissaient attendre. ■

S. B.

S. Doeleman et al., *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 875, L1 à L6, 2019

PALÉONTOLOGIE HUMAINE

DEUX NOUVELLES PIÈCES DU PUZZLE DÉNISOVIE

Une mâchoire au Tibet et deux métissages successifs des Papous avec les Denisoviens témoignent de l'aide que les gènes d'enisoviens ont apportée à *Homo sapiens*.

Deux découvertes – le premier fossile d'enisovien jamais trouvé hors de la grotte sibérienne de Denisova et le fait que les ancêtres des Papous se sont métissés deux fois avec des groupes distincts de Denisoviens – apportent des précisions sur l'histoire des humains. Elles montrent qu'au cours de son expansion et de ses métissages, *Homo sapiens* a intégré des gènes appartenant aux autres espèces humaines rencontrées et qui l'ont aidé à s'adapter à l'environnement local.

Les Denisoviens sont une forme humaine fortuitement découverte en 2010 par le séquençage de l'ADN contenu dans une phalange de main trouvée dans la grotte de Denisova. L'étude statistique à large spectre de génomes humains, effectuée dans les années suivantes, a montré que les ancêtres des Asiatiques orientaux se sont métissés avec des Denisoviens, puis que la sélection naturelle a retenu une petite proportion de gènes d'enisoviens.

Avec des collègues, François-Xavier Ricaut, du CNRS, avait entrepris d'étudier la diversité des gènes d'enisoviens chez les ancêtres de la population la plus métissée avec les Denisoviens, celle de Papouasie-Nouvelle-Guinée. Après avoir sélectionné dans l'ADN papou un jeu de « blocs » certainement d'enisoviens, les chercheurs ont comparé cet ADN avec l'ADN d'enisovien de référence (sibérien). Cette analyse indique qu'au cours de leur expansion à travers l'Asie du Sud et la Nouvelle-Guinée, les anciens *H. sapiens* se sont successivement métissés avec deux groupes d'enisoviens distincts. Et des calculs d'horloge moléculaire suggèrent que la dernière de ces hybridations s'est achevée il y a 30 000, voire peut-être 15 000 ans.

Selon les chercheurs, si le génome des habitants de Papouasie-Nouvelle-Guinée a intégré entre 4 et 6 % d'ADN d'enisovien, c'est bien parce que ce matériel génétique est utile à leur survie dans les forêts équatoriales humides de la grande île. Son rôle exact reste à préciser, mais il renforcerait le système immunitaire et l'adaptation alimentaire des Papous.

Quant à la mâchoire étudiée par une équipe menée par Jean-Jacques Hublin, du Collège de



Cet habitant de Papouasie-Nouvelle-Guinée (ci-dessus) porte des gènes d'enisoviens utiles à sa survie. La mandibule de Xiahe (ci-dessous), au Tibet, est le premier fossile d'enisovien jamais découvert hors de la grotte de Denisova, en Sibérie.



4%

C'EST LA PROPORTION MINIMALE D'ADN DÉNISOVIE QUE CONTIENT LE GÉNOME DES HABITANTS DE LA NOUVELLE-GUINÉE.

France, elle fournit une explication à certains des gènes d'enisoviens présents chez les Tibétains actuels.

Découverte à 3280 mètres d'altitude, la mandibule de Xiahe contient des protéines d'enisoviennes. Les dents qu'elle porte et sa forme présentent des traits rappelant ceux observables sur les microfossiles d'enisoviens de la grotte de Denisova. L'âge de 160 000 ans produit par la datation radiométrique (U-Th) de la calcite recouvrant la mandibule prouve que des Denisoviens s'étaient déjà adaptés aux hautes altitudes du plateau tibétain il y a 160 000 ans, en pleine glaciation du SIO6 (stade isotopique de l'oxygène 6, 191 000 à 123 000 ans), soit plus de 120 000 ans avant les premières traces archéologiques d'*H. sapiens* dans la région...

Comme ceux de tous les Extrême-Orientaux, le génome des *H. sapiens* actuels du plateau tibétain contient une petite proportion d'ADN d'enisovien (moins de 0,5 %), notamment l'allèle *EPAS1* qui réduit les effets du manque d'oxygène. La bonne adaptation physiologique des Tibétains aux hautes altitudes est donc héritée de celle des Denisoviens du plateau tibétain à l'époque du SIO6. ■

F. S.

G. Jacobs et al., *Cell*, en ligne le 10 avril 2019 ;
F. Chen et al., *Nature*, en ligne le 1^{er} mai 2019

UNE COALESCENCE COSMIQUE INÉDITE

La nouvelle saison de prise de données des détecteurs d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo* a débuté le 1^{er} avril de la plus belle façon. Plusieurs événements ont déjà été détectés, et l'un d'eux semble être la coalescence d'un trou noir et d'une étoile à neutrons. Ce serait le premier cas de ce genre. Mais cela reste à confirmer : le signal est très faible, l'événement s'étant produit à une distance comprise entre 0,9 et 1,6 milliard d'années-lumière.

BEOWULF, COMBIEN D'AUTEURS ?

Un débat ancien perdure autour de ce poème épique majeur de la littérature anglo-saxonne, datant de la fin du I^{er} millénaire de notre ère. Cette œuvre a-t-elle eu un ou plusieurs auteurs ? Pour apporter un élément de réponse, Madison Krieger, de l'université Harvard, et ses collègues ont réalisé une analyse statistique de stylométrie par ordinateur. Ils ont étudié la fréquence des combinaisons de lettres « ab », « ac », « ad », etc. La distribution est homogène et suggère qu'il n'y a eu qu'un seul auteur.

UN PREMIER SÉISME MARTIEN DÉTECTÉ

Fin novembre 2018, la sonde *InSight* s'est posée avec succès sur Mars. Elle a alors déployé un sismomètre posé à même le sol de la Planète rouge. Le 6 avril 2019, l'instrument a détecté son premier séisme. Même si Mars produit un bruit sismique très faible comparé à celui de la Terre, les chercheurs espèrent utiliser ces séismes pour mieux comprendre la structure interne de la planète. Le signal enregistré est toujours en cours d'analyse. Le séisme associé serait *a priori* trop faible pour être informatif, mais la sensibilité et l'efficacité de l'instrument sont démontrées.

LE SECRET DE LA SYRINX

Les oiseaux ont un chant très puissant qui n'est pas produit par le larynx, mais par un organe qui leur est spécifique : la syrinx. En effet, chez les oiseaux, le larynx a perdu sa fonction vocale et a été supplanté par la syrinx il y a probablement entre 66 et 68 millions d'années. Tobias Riede, de l'université Midwestern, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que la position beaucoup plus basse, dans la trachée, de la syrinx lui conférerait de meilleures performances acoustiques, mises à profit par l'appareil respiratoire très particulier des oiseaux.

Le larynx et la syrinx fonctionnent de la même façon : ils sont constitués de deux membranes qui encadrent un orifice central, la glotte. L'air provenant des poumons exerce alors une pression sur les membranes qui, au-dessus d'un certain seuil – le seuil de pression de phonation –, entraîne la vibration des deux membranes et l'émission d'ondes sonores.

La grande différence entre les deux organes réside dans leur localisation : le larynx se situe dans la gorge, au début de la trachée, tandis que la syrinx se situe à l'autre extrémité de la trachée, juste avant les bronches et les poumons. Or l'air au-dessus de la glotte freine l'écoulement de l'air sortant des membranes et exerce ainsi une pression qui entretient la vibration des membranes



Un organe propre aux oiseaux, la syrinx, confère à ces animaux la capacité de chanter avec une forte intensité.

et facilite la production de son. Tobias Riede et ses collègues ont supposé que la position basse de la syrinx augmente l'inertie acoustique de la colonne d'air au-dessus de la glotte, ce qui abaisse le seuil de pression de phonation.

Pour valider leur hypothèse, les chercheurs ont réalisé deux membranes en silicone qu'ils ont placées en position «syrinx» ou «larynx» dans une trachée artificielle. De l'air a alors été insufflé par un compresseur dans le dispositif. L'équipe a ainsi montré que la position «syrinx» des membranes permettait d'abaisser le seuil de phonation de 20 à 30 %, tout en produisant un son de plus forte amplitude. ■

CORALINE MADEC

T. Riede et al., *PLoS Biology*, vol. 17(2), article e2006507, 2019

ARCHÉES ET ÉTHANE

Autour des sources sous-marines d'hydrocarbures, des colonies microbiennes se servent des gaz comme source d'énergie. On connaissait des organismes consommant le méthane, le propane et le butane, mais pas l'éthane. Or les bilans de flux de ce gaz entre les sources profondes et la surface de l'océan suggéraient qu'il existait des «éthanotrophes». Song-Can Chen et ses collègues, du centre Helmholtz de recherche environnementale de Leipzig, ont identifié un nouveau microorganisme, l'archée *Candidatus* *Argoarchaeum* ethanivorans, qui se nourrit exclusivement d'éthane. Comme il se développe très lentement, il a fallu attendre dix ans avant que les colonies cultivées soient assez grandes pour être étudiées.

L'archée récupère l'énergie chimique de l'éthane en l'oxydant ; cependant, le dioxygène

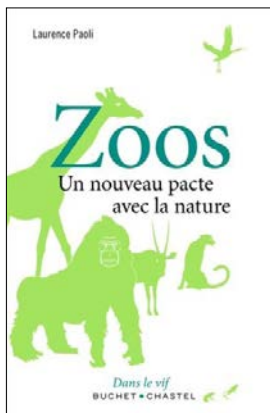
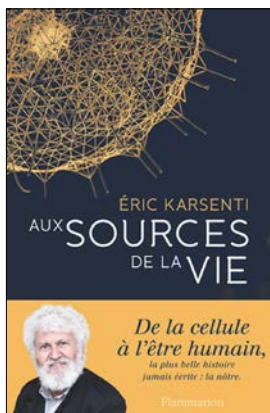


Source sous-marine de gaz naturel à près de 500 mètres de profondeur, au large des côtes de la Virginie.

est absent au fond des océans. Les chercheurs ont montré que l'archée vit en symbiose avec d'autres microorganismes qui réduisent les ions sulfates en sulfure et émettent ainsi du dioxygène. Les mécanismes de cette relation symbiotique sont encore en cours d'étude. ■

M. T.

S. C. Chen et al., *Nature*, vol. 568, pp. 108-111, 2019



BIOLOGIE

AUX SOURCES DE LA VIE

Éric Karsenti

Flammarion, 2019

304 pages, 21,90 euros

L'auteur nous emmène à bord de la goélette *Tara* pour étudier la diversité des organismes marins et comprendre l'évolution du vivant depuis les premières protocellules jusqu'à la biosphère actuelle; et d'une escalade à l'autre, jusqu'à l'origine de la vie.

La vie serait née de processus physicochimiques, grâce à l'apparition spontanée d'organisation permise par une dissipation d'énergie. Cette idée d'auto-organisation est ancienne, mais sa validation expérimentale et les preuves de son universalité manquaient. C'est l'aboutissement de cette quête qui nous est conté. Citons un exemple fascinant, issu des travaux de l'auteur: celui du fuseau mitotique, qui apparaît au cours de la division cellulaire. Ici, des moteurs moléculaires et des filaments s'auto-organisent pour produire une structure dynamique, en perpétuel ajustement, capable de séparer sans erreur les chromosomes nouvellement dupliqués entre les deux cellules filles.

Les formes et les structures du vivant émergent ainsi de comportements collectifs déterminés pour l'essentiel par les interactions entre les éléments constituant les organismes, voire entre les organismes eux-mêmes. L'auto-organisation peut tout autant rendre compte des mécanismes impliqués dans le développement d'un organisme à partir de l'œuf fécondé, que des événements par lesquels le vivant s'est complexifié à partir de cellules primitives. L'évolution par sélection naturelle distingue toutefois les organismes vivants des systèmes inanimés, mais l'auteur rejette l'idée d'une sélection par compétition: les innovations naissent au contraire de la complémentarité et de la coopération.

Un mérite de ce texte est de construire une synthèse pluridisciplinaire du vivant. On y croise autant les pères fondateurs de la biologie moderne que le physicochimiste Ilya Prigogine et le mathématicien Alan Turing. Un livre foisonnant et profond.

ANNICK LESNE
LPTMC-CNRS, PARIS

ESPACE

APOLLO CONFIDENTIEL

Lukas Viglietti

De Boeck, 2019

256 pages, 19,90 euros

Douze hommes ont marché sur la Lune. L'auteur en a rencontré dix, devenant l'ami de certains. À partir des témoignages exceptionnels qu'il a recueillis, il décrit ici leurs aventures, non seulement pendant le programme *Apollo*, mais aussi pendant leurs vies antérieure et postérieure à la mission.

Les marcheurs lunaires sont des Américains divers – leurs pères étaient militaires, plombier, ingénieur, paysan... – et certaines de leurs familles ont beaucoup souffert durant la grande dépression des années 1930. Mais tous ont un point commun: ce sont des pilotes de l'armée de l'air ou de la marine américaines. À l'exception du géologue Jack Schmitt, dont la compétence était indispensable pour récolter des échantillons lunaires. Or, une fois sélectionné, Jack Schmitt aussi reçut une formation de pilote militaire...

Quant à Neil Armstrong, il aurait préféré ne jamais devenir le «héros» que ses premiers pas sur la Lune ont fait de lui... Détail terrible méconnu du public, lui et Buzz Aldrin ont failli rester sur la Lune à cause d'un fusible servant à lancer le décollage. Égaré, l'objet a été retrouvé par hasard sur le sol lunaire poussiéreux...

Le récit de la mission *Apollo 13* est particulièrement émouvant: il rend palpable que, sans le sang-froid et l'implication des équipes au sol, les astronautes n'auraient jamais pu être récupérés.

L'auteur, pilote de ligne long-courrier, est passionné depuis longtemps par le programme *Apollo*. Avec son épouse Bettina, il a créé SwissApollo, une association destinée à faire connaître l'histoire du programme. Outre son amitié avec les marcheurs lunaires, il était ainsi particulièrement en position de mettre en avant les hommes qui ont fait la réussite de ce projet fascinant. Ce qui rend aussi son livre passionnant.

JEAN COUSTEIX
SAE-SUPAERO, TOULOUSE

ZOOLOGIE

ZOOS - UN NOUVEAU PACTE AVEC LA NATURE

Laurence Paoli

Buchet-Chastel, 2019

128 pages, 12 euros

Parmi les animaux que le public vient voir dans les parcs

animaliers, les espèces menacées – mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles ou même poissons... – sont nombreuses. Dès lors, quel rôle peuvent jouer les zoos dans leur protection?

Ancienne responsable du service de communication des quatre parcs animaliers du Muséum national d'histoire naturelle, l'auteure de ce petit livre a une opinion affirmée: son ouvrage vise à faire des zoos des acteurs incontournables de la défense de l'animal *via* leurs programmes d'élevage d'animaux menacés et de réintroduction dans la nature. Cela l'amène à critiquer l'attitude des administrations de tutelle qui lui paraissent freiner cette mutation nécessaire. Elle regrette aussi la frilosité avec laquelle les jardins zoologiques s'ouvrent à la recherche scientifique et pratiquent une pédagogie militante en faveur de la biodiversité.

Nous vivons une époque de remise en question dont la plus profonde concerne sans doute nos relations avec la nature. D'où des interrogations croissantes sur le statut de l'animal. Dans ce contexte, le rôle des zoos, qui furent d'abord des lieux de pouvoir pour les monarques, puis des espaces de récréation et d'éducation, interroge. Aujourd'hui les amis des bêtes leur sont parfois hostiles, en particulier les végétariens et les antispécistes qui leur reprochent l'enfermement des animaux sauvages et l'appauvrissement de la biodiversité qu'ils ont longtemps impliqué. Pour autant, étant donné qu'une humanité de plus en plus nombreuse fait peser des risques énormes sur la vie sauvage, l'auteure estime que les zoos peuvent jouer un rôle dans son maintien.

PIERRE JOUVENTIN
ÉTHOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS

MÉDECINE-PSYCHOLOGIE

LE SURPOIDS

Jean-Michel Lecerf, 2019

Quae, 2019

152 pages, 19 euros

Le poids, phobie contemporaine? Maigrir, un fantasme collectif

omniprésent? Certes, l'épidémie d'obésité est une réalité inquiétante aux conséquences de santé publique sévères, mais gardons-nous, face à tous ceux qui désespèrent de perdre du poids, de faire des raccourcis qui ne résolvent rien. Comprendre les multiples causes de l'obésité, décortiquer les mécanismes sous-jacents et faire preuve de pédagogie, tel est l'objectif de Jean-Michel Lecerf, chef de service en endocrinologie et maladies métaboliques à l'institut Pasteur de Lille.

Car prendre inexorablement du poids, est-ce dans la tête? Dans l'assiette? Dans la génétique? Dans le comportement et l'alimentation des parents bien avant la naissance ou dans l'éducation durant l'enfance? Dans l'hygiène de vie (sédentarité)? Dans le microbiote? Mais n'est-ce pas surtout dans le modèle de société qui crée des obèses tout en les stigmatisant? Le miroir que nous renvoie la société est culpabilisant et nous laisse en désespoir d'un mieux-être idéalisé hors d'atteinte. Cette distorsion est source d'angoisse, le plus souvent compensée par une consommation irraisonnée, favorisée par l'industrie agroalimentaire et le matraquage publicitaire.

Ce livre a le mérite d'expliquer de façon simple et claire les différentes méthodes actuelles de prise en charge. Il fait également la part belle à la prévention, aux politiques de santé publique et aux mesures d'aide aux choix alimentaires. Il laisse entrevoir les pistes de demain en incitant à fuir les régimes et autres injonctions non fondées. Mais surtout, il renferme un message profondément humain: on ne soigne pas un symptôme, mais des personnes en souffrance. Ce livre nous rappelle qu'apprendre à manger, c'est apprendre à s'estimer et à se faire du bien. À dévorer, donc!

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT

ET AUSSI



QUAND LE CERVEAU DEVIENT MASCULIN

Jacques Balthazart

Humensciences, 2019

256 pages, 21,90 euros

Pour créer une société d'égalité de droits entre les femmes et les hommes, « il est temps de regarder les différences entre cerveaux masculin et féminin », nous dit l'auteur. Ce neuroendocrinologue nous montre comment la théorie biologique de l'organisation précoce du cerveau et du comportement masculin explique en partie les différences neuro-anatomiques et comportementales entre hommes et femmes. Convaincant, passionnant, et pas le moins du monde péremptoire.

LES ENFANTS D'ASPERGER

Edith Sheffer

Flammarion, 2019

395 pages, 23,90 euros

Hans Asperger, qui a décrit le syndrome portant son nom, fut un psychiatre ayant endossé le programme eugéniste nazi. Les écrits de ce professeur à l'hôpital pédiatrique de Vienne visaient à trier les enfants atteints de « défauts biologiques ». S'agissant des autistes, il distinguait entre les « négatifs » et les « positifs », à qui l'intelligence donnait une chance d'échapper à l'élimination. L'enquête de l'auteure, historienne américaine de l'université de Berkeley, rappelle la pratique psychiatrique nazie et invite à questionner la pertinence des idées sur l'autisme qui nous viennent de Hans Asperger.

ANTIVAX

Françoise Salvadori et Laurent-Henri Vignaud

Vendémiaire, 2019

360 pages, 23 euros

Les « courants antivax », comme disent les auteurs, tous deux historiens des sciences, l'une médecin, sont les mouvances qui luttent contre le principe de la vaccination. Leurs arguments, apprend-on, sont sensiblement les mêmes que ceux brandis aux XVIII^e et XIX^e siècles. Divers, les antivaccinistes sont même parfois des scientifiques. Un livre bienvenu qui fait l'histoire et le point sur un phénomène de société puissant à l'heure de l'Internet, phénomène qui constitue un véritable danger de santé publique étant donné que, par exemple, près de 40 % des Français considèrent que les vaccins ne sont pas sûrs.

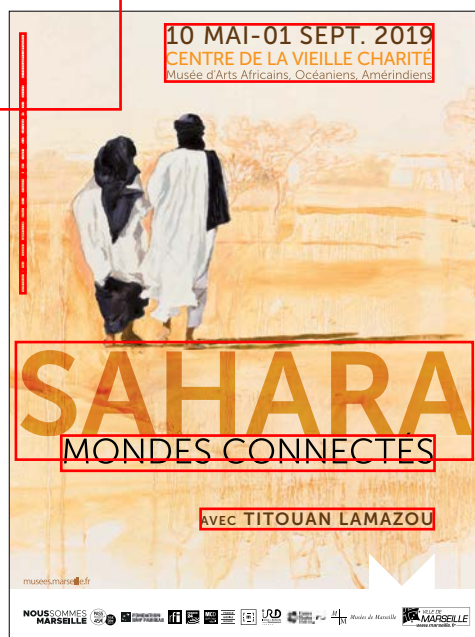
MARSEILLE

JUSQU'AU 1^{er} SEPTEMBRE 2019
Centre de la Vieille Charité
<https://vieille-charite-marseille.com>

Sahara, mondes connectés

Le musée d'Arts africains, océaniques, amérindiens situé au centre de la Vieille Charité propose cet été de voir le Sahara sous l'angle des mobilités des divers groupes humains que l'on y rencontre et des connexions qui s'établissent entre eux. Cette vaste étendue désertique peut aujourd'hui évoquer deux images contrastées: l'une d'un désert exotique et fascinant, l'autre d'une région en proie à une crise climatique, à des guerres et au terrorisme, à des trafics d'humains ou de marchandises, aux migrations... Entre les deux, l'exposition, née de la rencontre entre l'artiste-voyageur Titouan Lamazou et Charles Grémont, historien à l'IRD, veut amener ses visiteurs à découvrir que le Sahara est un territoire impermanent, fait de lieux et de moments essentiellement mobiles, et où les populations redéfinissent sans cesse leurs rapports aux autres, au temps et à l'espace.

Pour ce faire, sont présentés au public de beaux objets ethnographiques (certains très anciens) provenant de collections prestigieuses, des objets du quotidien, des réalisations audiovisuelles, des œuvres d'artistes contemporains. Ces présentations s'accompagnent aussi, tout le long, d'œuvres de



Titouan Lamazou, qui sillonne ces régions depuis de nombreuses années et offre son regard personnel à travers des portraits et des scènes de la vie quotidienne. ■

RENNES

JUSQU'AU 1^{er} SEPTEMBRE 2019
Espace des sciences
www.espace-sciences.org

Éternité – Rêve humain et réalités de la science

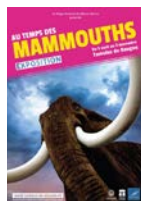


Cette exposition a pour point de départ le rêve de l'immortalité, illustré notamment avec une momie égyptienne ou un cœur artificiel. Elle se penche aussi sur le vieillissement, qui est comparé à celui d'autres animaux. Puis elle s'étend aux temps des espèces et de leurs extinctions, et enfin aux temps géologiques et astronomiques. ■

BOUGON (DEUX-SÈVRES)

JUSQU'AU 3 NOVEMBRE 2019
Musée des tumulus de Bougon
<https://tumulus-de-bougon.fr>

Au temps des mammouths



Reproduction en grandeur réelle d'un mammouth laineux, reconstitution de la hutte de Myzin, construite en os de mammouths, et autres pièces remarquables: la belle et intéressante exposition conçue et réalisée il y a quelques années par le Muséum national d'histoire naturelle poursuit son parcours itinérant. Ne pas hésiter à en profiter! ■

ET AUSSI

Du 3 au 7 juin
Blois
<https://bit.ly/2GR7elp>
RENCONTRES DE BLOIS
Ces rencontres qui réunissent des physiciens et des astrophysiciens s'accompagnent, comme dans les éditions précédentes, d'événements (conférences, exposition...) destinés au grand public.

Jeudi 6 juin, 18 h
Campus Aiguier, Marseille
provence-corse.cnrs.fr
PLASTIQUES ANTIBACTÉRIENS
Catherine Lefay, chimiste, explique les perspectives offertes par l'inclusion de molécules antibactériennes dans des matériaux polymères.

Mardi 11 juin, 17 h
Acad. des sciences, Paris
academie-sciences.fr
VIE ET MORT DES DINOSAURES
Le paléontologue et académicien Philippe Taquet raconte son parcours et ses recherches, puis répond aux questions de l'auditoire.

Les 14, 15 et 16 juin
France entière
journées-archeologie.fr
JOURNÉES NATIONALES DE L'ARCHÉOLOGIE
Coordonnées par l'Inrap, ces journées permettent au grand public, à travers de nombreuses animations, de découvrir la science qu'est l'archéologie et le patrimoine ancien du pays.

Mardi 18 juin, 20 h 30
Muséum de Nantes
<https://bit.ly/2vzPFAY>
LES GEMMES DE L'HIMALAYA
Conférence du géologue Benjamin Rondeau sur l'origine de ces gemmes.

Mardi 25 juin, 17 h
Acad. des sciences, Paris
academie-sciences.fr
ENTRE CHIMIE ET BIOLOGIE
Marc Fontecave, chimiste académicien et professeur au Collège de France, parle de ses travaux, souvent inspirés par les processus chimiques du vivant.

GENÈVE

JUSQU'AU 19 JANVIER 2020
Muséum de Genève
www.museum-geneve.ch

Prédations



La prédation est une relation dans laquelle un animal en tue un autre pour s'en nourrir et ainsi assurer sa survie. Telle est la définition qu'adopte cette exposition. Laquelle commence par retracer l'histoire de ce mode d'alimentation, qui remonte à plus de 580 millions d'années avec l'apparition des organismes pluricellulaires. C'est ensuite la place de la prédation dans les chaînes alimentaires et les écosystèmes qui est examinée. Enfin, l'exposition se penche sur le cas des primates, les humains en particulier: les régimes de nos ancêtres, la remise en cause de l'alimentation carnée... ■

BORDEAUX

DEPUIS LE 30 MARS 2019
Muséum de Bordeaux
www.museum-bordeaux.fr



Un muséum rénové à Bordeaux

Fermé depuis plus de dix ans, le Muséum de Bordeaux vient de rouvrir, après un vaste chantier de rénovation, de modernisation et d'extension. L'Hôtel de Lisleferme, le bâtiment dédié aux visites du public, présente dans son espace permanent une sélection de quelque 4000 spécimens, sur le thème «La nature vue par les hommes». Le muséum propose aussi des expositions semi-permanentes (sur le littoral aquitain, sur les bébés humains ou animaux) et temporaires (sur le sens du toucher, sur le rire...). ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 8 juin, 14 h
Ruffec (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13
parc-naturel-brenne.fr
LE GUËPIER D'EUROPE
Sur les rives de la Creuse, deux heures d'observation de la faune, dont ce très bel oiseau multicolore.

Samedi 22 juin, 9 h
Lauzet-UBaye (04)
Tél. 04 42 20 03 83
cen-paca.org
LA ROCHE ET ENVIRONS
Une randonnée naturaliste dans un site d'une grande diversité de milieux, appartenant au Conservatoire du littoral.

Dimanche 30 juin, 10 h
La Madelaine-sous-Montreuil, Pas-de-Calais
Tél. 03 21 06 50 73
LE MARAIS DE LA CALOTTERIE
Découverte à la journée des plantes de ce milieu humide.

**LES TRIBUNES
DU MUSÉUM**

TRIBUNE - SAMEDI 8 JUIN 2019
JOURNÉE MONDIALE & FÊTE DE L'OcéAN

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes
Détails sur mnhn.fr

La tribune :
Agissons pour l'océan !
De la science à l'action
Samedi 8 juin - 15h-17h
Entrée gratuite, tous publics

Le jeu des fake news
Participez à un quizz collectif pour démontrer l'impact considérable de l'information et la médiatisation sur les océans et la mer à l'heure du web conversationnel. Le public sera amené à interagir avec l'animateur via une application dédiée.

Les émissions de radios
Un studio d'enregistrement ouvert et participatif sera créé sur scène pour déconstruire les idées reçues autour des océans.

Première émission : « Plastique : comment s'en sortir ? » suivie d'une discussion mettant en avant à la fois les solutions techniques et les solutions institutionnelles.

Deuxième émission : « Comment limiter les effets du changement climatique sur la biodiversité marine ? » suivie d'une discussion mettant en valeur les enjeux et impacts actuels sur les milieux marins

Amphithéâtre Verniquet
(Grand Amphithéâtre du Muséum)
57 rue Cuvier, Paris 5^e



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LA VERTU DES MASQUES

Parade contre le harcèlement sur les réseaux sociaux, l'interdiction de l'anonymat est aussi une menace pour les libertés.



Le masque de Guy Fawkes, rendu célèbre par le mouvement hacktiviste Anonymous, est un symbole pour ceux qui défendent coûte que coûte la liberté d'expression.

Les émetteurs de fausses informations, qui nous manipulent, et de trolls, qui nous insultent, sont souvent bien installés derrière leur clavier et anonymes. D'où une idée simple pour nous protéger de leurs nuisances: leur supprimer ce droit à l'anonymat. Mais est-ce une si bonne idée?

Certains réseaux sociaux obligent déjà leurs utilisateurs à s'identifier par leur nom et non par un pseudonyme, même quand ces utilisateurs ont par ailleurs, par exemple, un nom d'artiste. Cette injonction à la transparence – avec l'argument que ceux qui n'ont rien à cacher n'ont rien à craindre – dépasse même le cadre des réseaux informatiques, puisque, en France, une loi interdit, depuis octobre 2010, de porter dans l'espace public une tenue destinée à dissimuler son visage.

Du point de vue technique, il n'est pas difficile de mettre en place cette interdiction sur les réseaux. Il serait par exemple simple d'empêcher quiconque de poster un message sur une plateforme de blogage ou de microblogage, d'envoyer un courrier électronique ou même de passer un appel

téléphonique sans que son identité ne soit dévoilée. Dans le même esprit, il ne serait pas non plus difficile d'enregistrer dans une base de données l'ADN des sept milliards d'humains, pour identifier automatiquement un criminel à partir d'un cheveu ou d'une trace de sueur retrouvés sur une scène de crime. Mais est-ce dans une telle société que nous souhaitons vivre?

On trouve déjà dans le commerce des kits de bioanonymat avec des sprays à ADN mélangés

Bien entendu, la victime d'un crime souhaite toujours que son auteur soit identifié et même la victime d'une agression verbale anonyme souhaite souvent voir son auteur démasqué. Mais, avant de renoncer à notre anonymat, nous devons nous poser deux questions: un tel renoncement est-il utile? Et, surtout, qu'y perdons-nous?

Il est peu probable qu'une mesure qui contraindrait chaque humain à faire enregistrer son ADN dans une base de données soit pleinement efficace. On trouve déjà dans le commerce des kits de bioanonymat qui contiennent un pulvérisateur d'un mélange d'ADN de diverses provenances. Cette technique permettrait de noyer l'information génétique et ainsi de dissimuler votre identité. Il n'est donc pas sûr qu'une base de données des ADN de tous les humains aide beaucoup à identifier les criminels. Il sera peut-être tout aussi simple de contourner les interdictions d'anonymats sur les réseaux, pour ceux qui le voudront.

Ce que nous perdons est, en revanche, bien plus certain. Depuis le XIII^e siècle, lors du carnaval, le port d'un masque autorisait les Vénitiens à dissimuler leur visage et à transgresser les normes sociales, sans se laisser identifier, rendant ces normes plus supportables le reste de l'année. Mais, à la fin du XVIII^e siècle, Napoléon Bonaparte, à la tête des troupes du Directoire, mit fin à cette tradition, pour éviter que des révolutionnaires se cachent sous ces masques.

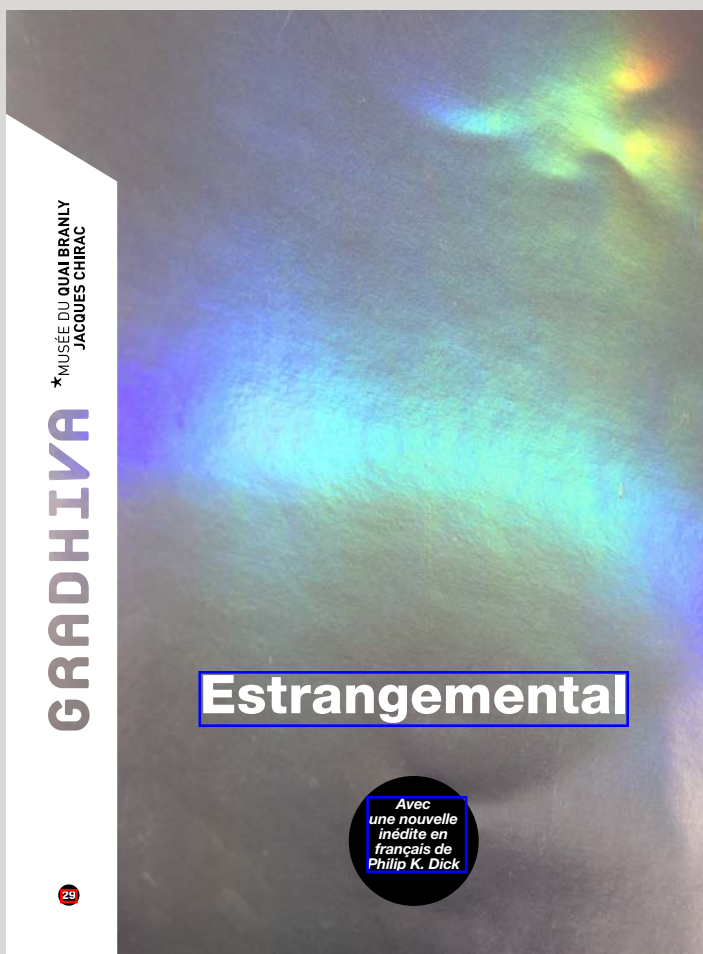
Egalement au XVIII^e siècle, les Anglais Jeremy et Samuel Bentham imaginèrent une architecture pour prison, la structure panoptique, qui permettait au gardien d'observer en permanence tous les prisonniers, sans que ceux-ci puissent se soustraire à cette surveillance, ni même savoir s'ils étaient observés ou non. Au XX^e siècle, dans son roman 1984, George Orwell poussa l'idée à l'extrême: un régime surveillant constamment chaque citoyen – et l'impossibilité pour celui-ci de s'y soustraire. Cette observation permanente de la population, pour l'auteur, était l'une des caractéristiques des dictatures.

La transparence de ces deux systèmes, carcéral et politique, nous semblait naguère être le symbole de la négation de notre humanité. Est-elle en passe de devenir notre nouvelle normalité? ■

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

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY JACQUES CHIRAC

LA REVUE GRADHIVA★



ESTRANGEMENTAL

Le soupçon sur la nature de la réalité et sur ce qu'elle pourrait camoufler est au point de départ de nombreuses enquêtes d'anthropologues ayant travaillé sur la sorcellerie, la magie ou la divination. Il est aussi au cœur de beaucoup des romans de Philip K. Dick : l'écrivain américain a développé tout au long de sa vie une œuvre romanesque puis philosophique et théologique mettant en jeu des multiplicités de réalités parallèles. Dès lors, dans quelle mesure peut-on considérer Philip K. Dick comme un anthropologue ? Et qu'est-ce que les anthropologues ont-il à apprendre de sa lecture ?

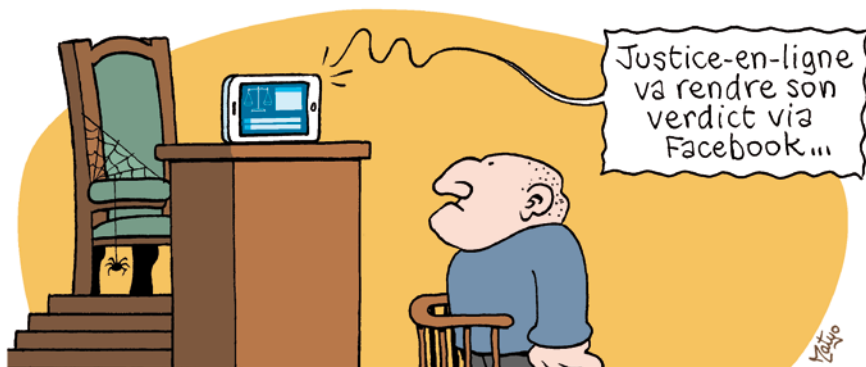
En vente en librairie et en ligne sur www.librairie-epona.fr/revues/gradhiva.html
Retrouvez tous les numéros de Gradhiva sur www.quaibranly.fr/fr/gradhiva



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

L'ÉTAT UBÉRISÉ ET L'INTÉRÊT GÉNÉRAL

Aux yeux des utilisateurs d'un service dématérialisé, l'usage qui est fait des données personnelles importe plus que le caractère public ou privé de l'autorité qui les gère.



Suite aux attentats du 23 avril au Sri Lanka, le dispositif «Safety check» de Facebook a été activé. Il permet à ses utilisateurs, en cas de catastrophe naturelle ou d'événement dramatique, de prévenir leurs proches qu'ils sont en sécurité. Ce service remplit en pratique une fonction régaliennne de sécurité: l'identification rapide des victimes et des survivants.

Bien que sous le contrôle de Facebook, compagnie privée californienne, cette application ne suscite pas la moindre inquiétude ni résistance. Il ne faut donc pas voir dans l'expansion des géants du numérique un facteur susceptible d'ébranler la confiance dans des services dématérialisés. Le marché ne signe pas la fin de la logique d'intérêt général, même si ce contrôle de tâches régaliennes par le privé apparaît incompatible avec la souveraineté étatique. En outre, les autorités publiques et le secteur marchand ont une longue histoire de partenariat.

Mais l'affaire est loin d'être close. La modernisation en cours de nos administrations, voulues à la fois plus efficaces et plus

proches, interroge nos représentations de l'intérêt général. En ayant créé en 2015 un réseau de «start-up d'État» (voir <https://beta.gouv.fr/>), le gouvernement français vise à simplifier les démarches administratives, réduire les files d'attente, faciliter l'accès au droit et à la culture dans des secteurs aussi variés que l'emploi, la formation, le handicap ou les transports. Le but est louable: il s'agit de prendre le train des

Les nouvelles formes de partenariats public-privé des services publics en ligne inquiètent

transformations culturelles de nos organisations en dématérialisant des services publics susceptibles d'être améliorés par le retour direct de ses usagers. Le défi de ces dispositifs, qu'ils soient ou non l'œuvre de structures privées, est de proposer aux citoyens des services en ligne qu'ils

reconnaîtront comme relevant de l'intérêt général. Or la difficulté est double.

La première est l'ubérisation de l'État. Clément Bertholet et Laura Létourneau, deux hauts fonctionnaires, l'ont décrite comme «la mise en œuvre de plateformes numériques de confiance sans infrastructures physiques ni opérateurs et centrés sur le client» (*Ubérisons l'État!*, Armand Colin, 2017). Ce modèle organisationnel fondé sur un contact direct des usagers reconfigure radicalement le rapport aux données administratives, qui ne sont plus localisées sur le territoire des institutions publiques. Définies par l'usage qui en est fait plutôt que par l'autorité qui les gouverne, les données deviennent l'objet d'une géopolitique.

Ainsi, nous acceptons d'être géolocalisés pour trouver un taxi ou un restaurant à proximité, mais pas si cela suppose de recevoir des publicités ciblées – comme l'a illustré une controverse récente sur l'application Izly, utilisée par les étudiants pour payer un repas au restaurant universitaire. Les nouvelles formes de partenariat entre le public et le privé de tels services en ligne inquiètent, car la technicité de leurs «conditions générales d'utilisation» les rend opaques au grand public, tandis que le devenir des données collectées pose question.

La deuxième difficulté consiste à identifier les services publics devant être «massivement personnalisés» pour lutter contre la fragilité de nos guichets administratifs. La personnalisation des interfaces citoyens-État transformera notre perception de l'intérêt général. Pourra-t-on choisir en ligne les traits socioculturels de son interlocuteur à l'hôpital ou à Pôle emploi? Nos données de géolocalisation seront-elles déterminantes dans l'attribution d'un logement social? L'adaptation des services publics suppose de maintenir à tout prix leur neutralité, de moderniser l'autorité morale de la puissance publique, qu'incarnaient jadis les hussards noirs de la République, en préservant nos libertés privées. Le défi est de taille. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

LES GRANDES VOIX DE LA RECHERCHE

Les médaillés d'or du CNRS explorent tous les domaines de la connaissance et présentent de manière claire et synthétique les grands défis de la science



6 juin



6 juin



6 juin



29 août



29 août



29 août



19 septembre



19 septembre

CNRS EDITIONS



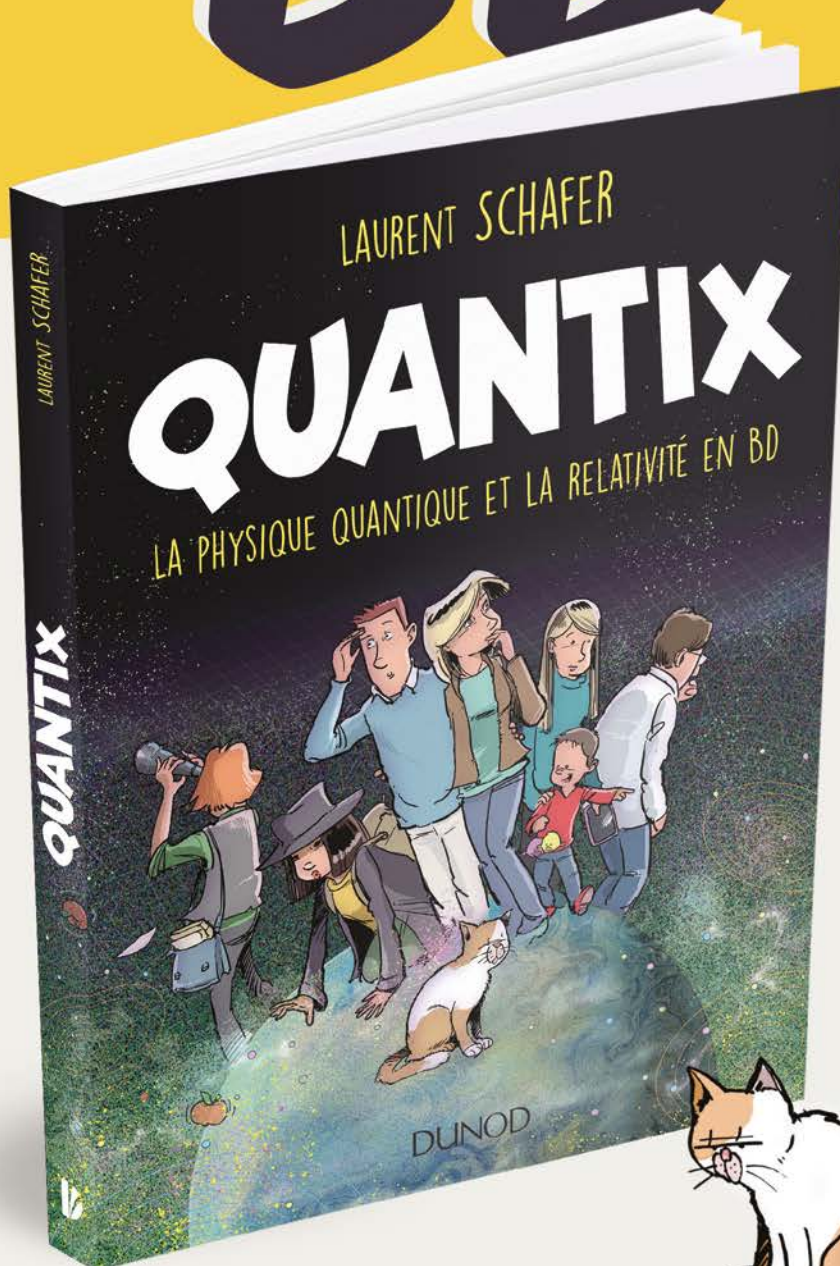
96 pages - 8,00 €

Retrouvez-nous sur



et sur www.cnrseditions.fr

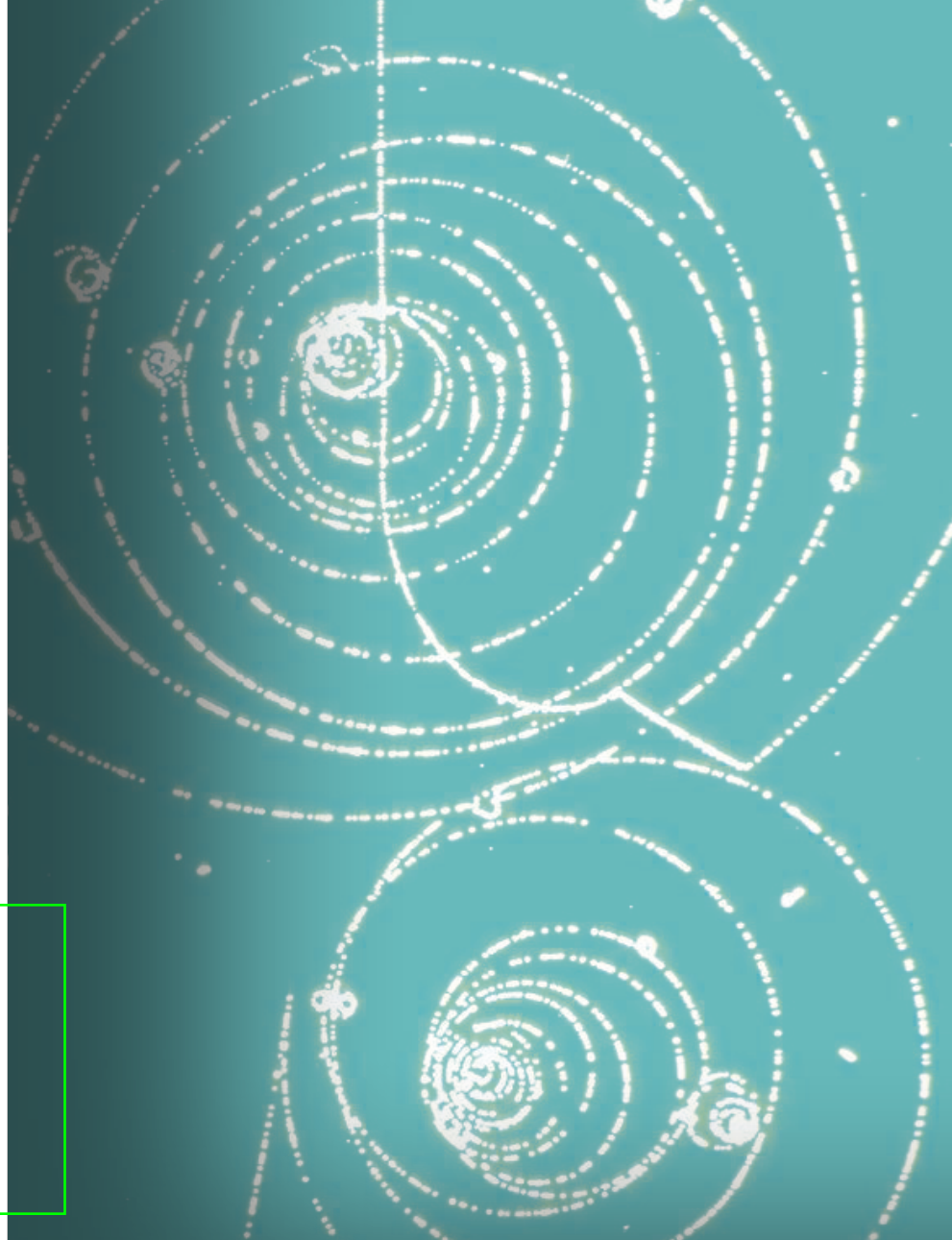
LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LA RELATIVITÉ EN **BD**



« Amusant et
Fascinant ! »

Carlo Rovelli,
physicien théoricien





La physique quantique a aujourd'hui presque 100 ans. Cette théorie jamais mise en défaut a révolutionné les sciences de la matière. Elle a donné lieu à de nombreuses applications, dont certaines, comme le transistor, sont au fondement de la révolution informatique. En a-t-on épuisé les ressources ? Pas du tout. On assiste même à un grand renouveau. Sur le plan fondamental, d'abord, l'interprétation de cette théorie, un défi déjà ancien, se pose aujourd'hui en des termes nouveaux, liés qui plus est à la question de la gravitation. Et sur le plan des applications, toute une ingénierie quantique se développe, qui fera peut-être passer l'ordinateur quantique du rêve à la réalité.

La théorie quantique de demain

L'ESSENTIEL

> La physique quantique a démontré son efficacité pour décrire des phénomènes et prédire les résultats d'expériences.

> Grâce aux travaux de John Bell et aux expériences d'Alain Aspect, il a été prouvé que cette théorie est non locale. Mais que dit-elle vraiment du monde ?

> Son interprétation pose toujours des difficultés, et diverses voies sont explorées pour les résoudre.

> Un autre défi est de construire une théorie quantique de la gravitation, capable de décrire les premiers instants de l'Univers et le cœur des trous noirs.

LES AUTEURS



ETIENNE KLEIN
directeur
du laboratoire Larsim
du CEA à Saclay,
au sud de Paris



CARLO ROVELLI
professeur à l'université de
la Méditerranée, chercheur
au Centre de physique
théorique, à Marseille

Les nouveaux défis de la physique quantique

Née il y a près de 100 ans, la physique quantique n'a jamais été mise en défaut et est au cœur des technologies modernes. Mais les difficultés de son interprétation persistent. Elles ont même suscité de nouvelles réflexions, parfois liées à un autre problème majeur et tout aussi persistant : l'élaboration d'une théorie quantique de la gravitation.





Le chat à la fois mort et vivant de Schrödinger symbolise tout le caractère contre-intuitif de la physique quantique et les progrès qui restent à faire pour comprendre les lois étranges de cette théorie.

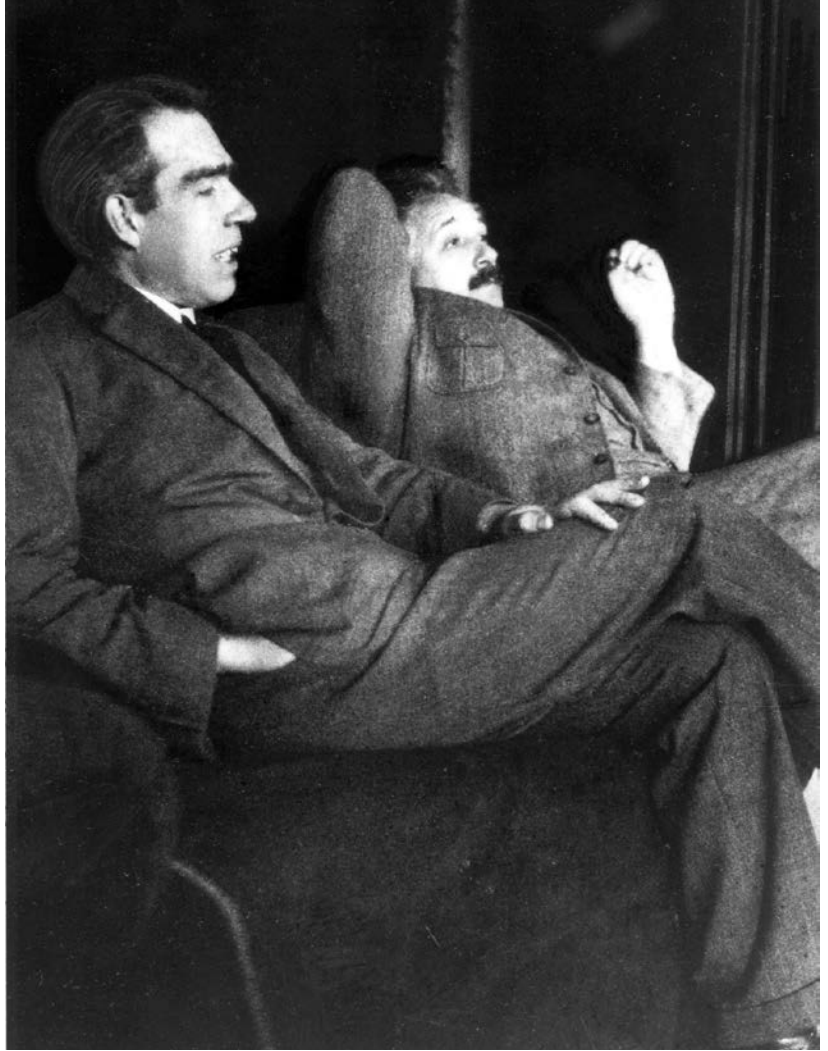
Au cours des années 1920, pour expliquer le comportement assez étrange des atomes et des particules, les physiciens ont développé des concepts radicalement neufs qui les ont conduits à penser autrement la matière et ses interactions. Une décennie d'effervescence créatrice et d'intense labeur a suffi pour qu'un petit nombre d'entre eux fondent l'une des plus belles constructions intellectuelles de tous les temps, la physique quantique. Celle-ci rencontra rapidement un vif succès, grâce à la confirmation de ses prédictions expérimentales précises. Elle est aujourd'hui omniprésente dans notre quotidien : dans l'électronique de nos ordinateurs, dans nos téléphones portables, dans nos écrans ; elle est aussi à la source des lasers qui envoient de l'information aux quatre coins du monde.

Pourtant, malgré son succès incontestable, la physique quantique reste énigmatique par bien des aspects, notamment parce que cet édifice théorique exige un travail d'interprétation, que les physiciens ont les pires difficultés à mener à bien. Il faut dire que la théorie quantique pose des questions à la fois inédites et vertigineuses : comment comprendre son formalisme ? Est-ce un simple outil pour prévoir les résultats d'une expérience ? Quel statut confère-t-elle au hasard qui intervient dans la détermination des résultats ? Donne-t-elle accès à une description de la réalité du monde ?

Si la physique quantique troubla tant, c'est parce qu'elle échappait au cadre d'interprétation de la physique classique. À tout système, la physique classique attache des propriétés qui appartiennent en propre au système (par exemple, tel vélo est bleu et roule à 30 kilomètres par heure), et n'attribue pas de rôle fondamental à l'opération de mesure, qui n'est que l'enregistrement neutre et passif de grandeurs existant objectivement (le vélo est bleu, qu'on le regarde ou non).

QUAND EINSTEIN ET BOHR S'OPPOSENT

La physique quantique, elle, ne semble pas partager un « engagement ontologique » aussi fort. D'abord, elle n'accorde aux particules ni position, ni trajectoire, ni forme bien déterminées. Ensuite et surtout, elle renonce à faire usage de l'idée, pourtant élémentaire, consistant à attribuer aux particules une réalité qui serait pleinement indépendante des moyens de l'observer. Était-ce le signe que le cadre d'interprétation classique devait être définitivement abandonné ? Ou bien, au contraire, qu'il manquait à cette nouvelle physique des ingrédients dont la prise en compte la ferait « rentrer dans le rang » ?



Niels Bohr (à gauche) et Albert Einstein ont contribué à la fondation de la physique quantique et à son interprétation. Ils ont confronté leurs visions antagonistes lors de débats qui ont profondément marqué les développements de cette théorie et qui ont permis de mieux la comprendre.

C'est autour de ces questions que les physiciens Niels Bohr et Albert Einstein se sont amicalement, mais fermement, opposés l'un à l'autre (voir la photo ci-dessus). Bohr considérait que la physique quantique obligeait à bouleverser les théories rendant compte du rapport que nous avons avec ce qu'on nomme par commodité (sans en dire davantage) « la réalité ». Einstein pensait, lui, qu'il était prématuré de conclure de la sorte. Le père de la relativité n'a jamais prétendu que la physique quantique fût une théorie fausse, mais, selon lui, une théorie physique ne doit pas être jugée à l'aune de sa seule efficacité opératoire : elle doit aussi dépendre des structures intimes du réel. Or, à ses yeux, la physique quantique, malgré ses spectaculaires et incontestables succès expérimentaux, ne faisait pas cela de façon satisfaisante.

Dans le cadre de la théorie quantique, un système physique est décrit par un objet mathématique, la fonction d'onde. Celle-ci s'écrit, en général, comme la somme de plusieurs fonctions représentant chacune un état particulier, affecté d'un certain coefficient – une « superposition » d'états possibles qui est une situation sans équivalent en physique classique. La théorie stipule alors que connaissant la fonction d'onde, on ne peut en général pas déterminer le résultat d'une mesure, mais

seulement calculer les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat. Et parmi tous les résultats possibles *a priori*, un seul est sélectionné, au hasard, par l'opération de mesure. Cette dernière entraîne une «réduction des possibles» qui s'effectue d'un coup et de façon aléatoire (voir l'encadré page 30).

Or, selon Einstein, une bonne théorie physique se doit d'éliminer le hasard, sinon de ses constructions, du moins de ses principes. Ensuite, Einstein tenait à une certaine forme de «réalisme», l'idée d'un monde réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, que nous les observions ou non. Or, constatant que ce réalisme-là est compromis

Pour Einstein, le monde réel existe objectivement, que nous l'observions ou non

par la physique quantique, il voulut démontrer qu'il existait des éléments de réalité que cette théorie n'est pas en mesure d'appréhender. Cette dernière serait donc incomplète, d'où cette impression d'une description fondée sur le hasard et ne décrivant pas un monde qui existe indépendamment de l'observation.

Bohr, lui, répugnait à considérer qu'il existât une réalité objective, indépendante de l'appareil de mesure. Selon lui, ce qu'une théorie physique peut prétendre décrire, ce sont seulement des phénomènes incluant dans leur définition le contexte expérimental qui les rend manifestes. La physique quantique n'avait donc pas besoin d'être amendée. Cette vision est à la base de ce qu'on nomme l'interprétation de Copenhague (et ses différentes nuances), portée par Bohr, Werner Heisenberg et d'autres, et qui a longtemps été considérée comme la seule façon de concevoir la physique quantique.

Le débat entre Einstein et Bohr démarra en 1927, à Bruxelles, lors d'un congrès Solvay, une conférence scientifique qui réunissait les plus grands physiciens de l'époque. Einstein chercha une contradiction dans les «relations d'incertitude de Heisenberg», qui concernent le comportement de particules quantiques individuelles. Ces relations fondamentales de

la théorie quantique s'expriment sous la forme d'inégalités qui relient deux grandeurs dites complémentaires, comme la position et la vitesse. Une conséquence de ces inégalités est qu'il n'est pas possible de connaître parfaitement les grandeurs complémentaires en même temps. Mais à chaque offensive, Bohr parvint à contrer les arguments d'Einstein.

En 1935, la discussion reprit autour d'un article signé par Einstein et deux de ses collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ce texte comportait une objection concernant non plus le comportement d'une seule particule, mais celui d'une paire de particules – dont les propriétés sont si étroitement liées que l'on parle de «particules intriquées» – et s'intitulait: «La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète?» Question à laquelle les trois chercheurs répondaient par la négative.

Leur raisonnement s'appuie sur trois hypothèses. La première stipule que les prédictions de la physique quantique sont justes. Il n'est pas question pour Einstein et ses collègues de considérer que la physique quantique est une théorie fautive, ils questionnent juste sa cohérence interne.

Deuxième hypothèse: aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière, conformément à la relativité restreinte. Ce critère de localité implique tout simplement que lorsque deux événements sont si lointains dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'a pas le temps de les relier, aucun de ces deux événements ne peut agir sur l'autre; ils se déroulent alors «chacun dans son coin», exactement comme si l'autre n'avait pas eu lieu. Et si on applique le critère de localité aux particules, il implique que chacune transporte avec elle, c'est-à-dire «localement», les propriétés qui vont déterminer les résultats des mesures.

Enfin, le dernier critère, l'hypothèse de réalité, indique que si l'on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette grandeur. La valeur trouvée n'est ni une hallucination ni un fantôme: un élément de réalité lui correspond nécessairement, et le formalisme se doit de l'intégrer, sans quoi il ne serait pas complet.

L'ARGUMENT EPR SÈME LE TROUBLE

Mises ensemble, ces trois hypothèses précisent ce qu'il faut entendre par le concept d'objet réel en restant proches d'un certain bon sens et des idées de la physique classique. Forts de ces arguments, Einstein, Podolsky et Rosen considérèrent une expérience de pensée s'appuyant sur un système constitué de deux électrons intriqués, créés par un processus liant

FONCTION D'ONDE, SUPERPOSITION D'ÉTATS, DÉCOHÉRENCE

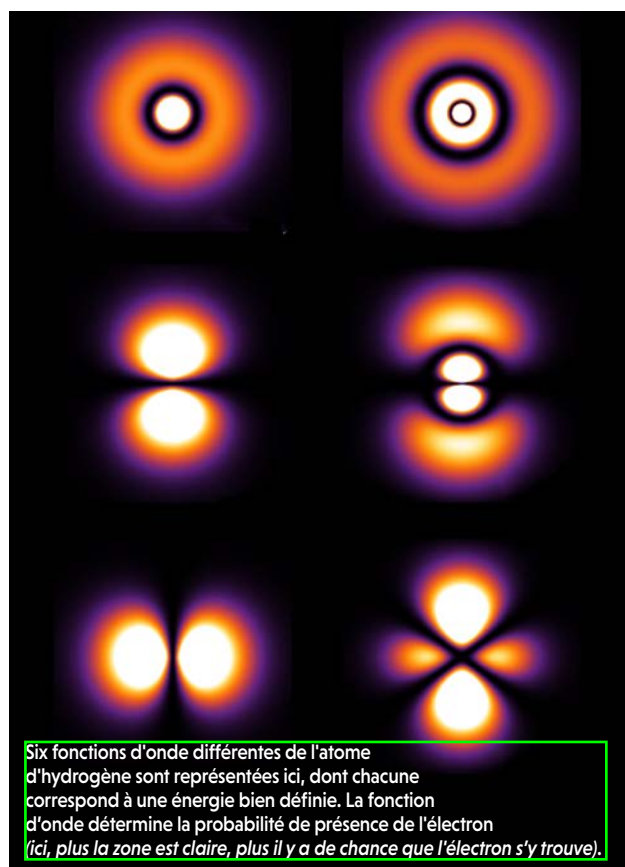
En physique quantique, une particule est décrite par une fonction d'onde, souvent notée $|\Psi\rangle$. Cet objet mathématique permet de calculer les propriétés de la particule telles que son énergie. Si, par exemple, la particule peut avoir deux énergies possibles E_1 et E_2 , ces dernières sont associées à deux états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$ et, de façon générale, la fonction d'onde de la particule s'écrit comme une superposition de ces deux états : $|\Psi\rangle = a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ où a_1 et a_2 sont les « amplitudes de probabilité » associées aux deux états. Lors d'une mesure de l'énergie de la particule, l'instrument affichera une seule valeur, E_1 ou E_2 . La physique quantique ne prédit pas le résultat de la mesure, mais seulement les probabilités des résultats possibles. Ainsi, d'après l'un des axiomes de la théorie quantique, les énergies E_1 et E_2 sont obtenues avec des probabilités égales à $|a_1|^2$ et $|a_2|^2$ respectivement (la somme des probabilités $|a_1|^2 + |a_2|^2$ étant égale à 1).

Mélange statistique ou superposition d'états ?
Un problème expérimental se pose quand on étudie un ensemble de particules. Il est possible de préparer

le mélange avec une proportion p_1 des particules dans l'état $|e_1\rangle$ et p_2 dans l'état $|e_2\rangle$; on parle dans ce cas de mélange statistique des états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$. Or un tel mélange est très différent d'une superposition d'états $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$, même si la simple mesure des énergies donne les mêmes résultats quand $p_1 = |a_1|^2$ et $p_2 = |a_2|^2$. On peut distinguer les deux situations à l'aide d'opérations appropriées qui mélangent les états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$, par exemple en appliquant un champ électrique au système, et en mesurant ensuite l'énergie. Les probabilités des résultats seront alors différentes de celles avec une superposition d'états.

Effondrement de la fonction d'onde
Lors d'une mesure de l'énergie, une seule valeur est obtenue parmi les cas possibles, par exemple E_1 . Juste après la mesure, la fonction d'onde se réduit instantanément à $|\Psi\rangle = |e_1\rangle$. On parle alors d'effondrement de la fonction d'onde, qui passe brutalement de l'état $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ (par exemple) à l'état $|e_1\rangle$. Ce phénomène discontinu et instantané est difficile à comprendre.

Décohérence macroscopique
Autre problème avec les superpositions d'états : on ne les observe pas dans le monde macroscopique. Erwin Schrödinger a illustré cette difficulté avec sa fameuse expérience du chat dans une boîte, où un mécanisme reposant sur un processus microscopique aléatoire tue



Six fonctions d'onde différentes de l'atome d'hydrogène sont représentées ici, dont chacune correspond à une énergie bien définie. La fonction d'onde détermine la probabilité de présence de l'électron (ici, plus la zone est claire, plus il y a de chance que l'électron s'y trouve).

le chat s'il est déclenché. Tant qu'on n'a pas ouvert la boîte pour voir l'état du chat, le mécanisme serait dans une superposition d'états « déclenché » et « non déclenché ». Cette superposition impliquerait que le chat serait dans une superposition des états « mort » et « vivant », situation qui paraît impossible, en tout cas inobservée. En 1970, le théoricien allemand Dieter Zeh a proposé d'expliquer

l'absence de superpositions d'états pour des systèmes macroscopiques par un processus de « décohérence quantique » dû aux interactions du système avec son environnement. Ces interactions détruiraient une superposition d'états d'autant plus vite que le système est grand. En 1996, des expériences de l'équipe de Serge Haroche, à Paris, ont confirmé pour la première fois ce scénario de passage du quantique au classique.

Leurs vitesse et position dans des rapports pré-établis. Plus précisément, les deux électrons partent dans des directions opposées à la même vitesse. En mesurant la vitesse de la particule 1, on en déduit la vitesse de la particule 2 au même instant *sans altérer son état* ; en vertu du critère de réalité, la vitesse de la particule 2 est donc un élément de réalité. En procédant de même avec la position, on arrive à la conclusion que la position de la particule 2 est également un élément de réalité. Or, mises ensemble, ces deux assertions contredisent le principe d'indétermination de Heisenberg, selon lequel la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être déterminées simultanément.

Cette contradiction amena les trois chercheurs à conclure que la physique quantique n'est pas en mesure de rendre compte de ces éléments de réalité (ici la position et la vitesse). Il faut donc considérer la théorie comme incomplète : des variables qui n'apparaissent pas dans son formalisme mathématique porteraient ces informations, ces éléments de réalité. Ou alors, il faudrait imaginer que la position et la vitesse ne sont pas des éléments de réalité ; et que la mesure opérée sur la particule 1 déterminerait, à distance, instantanément et comme par miracle (par « télépathie » dira plus tard Einstein), les grandeurs relatives à la particule 2. Cette solution était

impossible aux yeux des trois physiciens, car elle violait l'hypothèse de localité et les lois de la relativité restreinte. La physique quantique serait alors une théorie dite non locale.

Pour mieux comprendre le problème, choisissons une illustration plus proche de l'expérience commune. Supposons que nous disposions de deux cartes, l'une bleue, l'autre rouge, et que nous les placions chacune dans une enveloppe scellée. Mélangeons les deux enveloppes à l'abri de tout regard, puis donnons-en une à Paul et l'autre à Julie. Lorsque Paul ouvre son enveloppe, il découvre la couleur de sa carte. Le résultat qu'il obtient est évidemment corrélé avec celui qu'obtiendra Julie: si la carte de Paul est bleue, celle de Julie sera rouge, et inversement. Comment interpréter cela? Tout simplement en considérant que les couleurs respectives des cartes de Paul et Julie étaient déjà fixées avant l'ouverture de l'enveloppe: cette action n'a fait que révéler une situation qui n'était pas encore connue de Paul, mais qui était déjà parfaitement déterminée.

En d'autres termes, ce n'est pas le fait que Paul prenne connaissance de la couleur de sa carte qui a fixé cette couleur, ni qui aurait ensuite déterminé la couleur de la carte de Julie par l'envoi de quelque information transmise de la première enveloppe vers la seconde. Les deux cartes se trouvent avoir la couleur qu'elles ont en vertu de la cause commune qui les a fixées lorsqu'elles ont été glissées dans les enveloppes.

Pour Einstein, Podolsky et Rosen, la théorie quantique souffrait d'incomplétude

C'est ce type d'arguments que l'hypothèse de réalité d'Einstein condense: il y a un «élément de réalité physique» associé à la couleur de la carte de Julie puisque, sans ouvrir l'enveloppe qu'elle a entre les mains, elle est capable de la connaître. Il lui suffit de demander à Paul le résultat qu'il a obtenu et d'en tirer la conclusion.

Le cas des cartes de Paul et Julie est évidemment un problème de nature classique, où la part probabiliste (la carte de Julie est-elle rouge

ou bleue?) prend sa source dans le «mélange statistique» initial des cartes. Dans le cas d'un système quantique de deux électrons intriqués, c'est la superposition des états qui entre en jeu. Mais ce qu'Einstein et ses deux collègues démontrent, c'est que l'application du critère de réalité à la théorie quantique conduit au «paradoxe EPR» (d'après les initiales des trois signataires). Plus précisément, pour garantir le réalisme et éviter des conflits de cohérence internes à la théorie, il doit exister des variables additionnelles qui ne sont pas contenues dans la physique quantique. Ce formalisme est ainsi pris en flagrant délit d'incomplétude. Il doit donc exister, selon Einstein et ses collègues, un niveau de description plus fin de la réalité que celui proposé par la physique quantique.

DÉBAT EINSTEIN-BOHR: UNE ISSUE GRÂCE À JOHN BELL

Dès la publication de cet article, Bohr décida de défendre la physique quantique telle qu'elle est. Mais il comprit vite que le raisonnement d'Einstein était extrêmement subtil et que sa réfutation serait délicate. Bien sûr, la réponse qu'il apportait à la question posée (la physique quantique est-elle complète?) était un oui sans équivoque, mais son argumentation semblait plutôt confuse. Incapable d'identifier la moindre erreur dans l'argumentation EPR, Bohr fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein n'étaient pas assez solides et sa critique porta essentiellement sur le critère de réalité de son interlocuteur.

À vrai dire, ces débats n'intéressaient guère les physiciens, car ils n'avaient pas d'incidence sur leur façon d'utiliser le formalisme de la physique quantique, c'est-à-dire de faire des calculs et des prédictions qui étaient toujours en accord avec les mesures. La fécondité de la théorie quantique était même si spectaculaire et si vaste qu'il n'apparaissait ni nécessaire ni utile de mieux la comprendre.

Mais en 1964, au Cern, près de Genève, un physicien nord-irlandais du nom de John Bell, très soucieux, lui, de clarté conceptuelle, vint modifier radicalement la situation et transforma le débat, initialement philosophique, en un problème de physique.

Bell était au départ un physicien «réaliste» comme Einstein, c'est-à-dire qu'il partageait *a priori* son point de vue selon lequel les événements surviennent indépendamment du contexte expérimental de leur manifestation. Mais il avait remarqué quelque chose de curieux: toutes les théories qui avaient été bâties jusqu'alors dans le but de compléter le formalisme de la physique quantique par l'introduction de paramètres supplémentaires ne parvenaient à satisfaire aux hypothèses de validité de la physique quantique et de réalité qu'en violant l'hypothèse

de localité ! Autrement dit, ces théories étaient toutes non locales.

S'agissait-il d'une imperfection de ces théories particulières ? Ou bien était-ce une propriété générale de toutes les théories à paramètres supplémentaires susceptibles d'être construites ? C'est ce que Bell voulut savoir. À sa grande surprise, il parvint à démontrer que, dans tous les cas, quelle que soit la façon de s'y prendre, aucune théorie prétendant décrire la réalité ne pourra respecter le critère de localité.

Bell alla plus loin en proposant des situations expérimentales où la physique quantique donnerait des prédictions différentes d'une théorie prétendant la compléter en respectant l'hypothèse de localité, grâce, par exemple, à l'introduction de ce qu'on nomme des « variables cachées locales ». La controverse entre Bohr et Einstein allait pouvoir être tranchée au laboratoire !

De fait, au début des années 1980, une équipe de chercheurs de l'Institut d'optique d'Orsay, dirigée par Alain Aspect, mena à bien une série d'expériences avec des photons intriqués, qui montra qu'en l'occurrence, ce sont les prédictions de la physique quantique telle qu'elle est qui sont justes, et non celles des théories concurrentes. En définitive, c'est toute la classe des théories réalistes locales qui se trouvait là réfutée. Par la suite, d'autres expériences plus précises et plus élaborées (voir l'image page 36), menées avec des photons mais aussi avec des particules de matière, démontreront elles aussi, de façon irréfutable, l'absence d'échappatoires pour les théories à variables cachées locales.

LA THÉORIE QUANTIQUE EST NON LOCALE

On doit alors admettre le caractère non local de la théorie quantique, mais qu'est-ce que cela signifie ? Cela implique que dans certaines situations, deux particules qui ont interagi dans le passé ont des liens que leur distance mutuelle, aussi grande soit-elle, n'affaiblit pas. Ce qui arrive à l'une des deux est irrémédiablement associé (intriqué) à ce qui arrive à l'autre, par l'entremise d'une connexion étrange, sans équivalent dans le monde ordinaire, car elle ne résulte pas de la transmission d'une information à distance. La paire formée par les deux particules a des propriétés globales que n'ont pas les particules individuelles. Ce phénomène étrange impose de renoncer définitivement à interpréter la physique quantique dans le sens des idées d'Einstein. En particulier, il n'y a aucun moyen de compléter la physique quantique en termes de variables cachées locales.

Ce résultat a été une grande avancée dans la compréhension de la physique quantique. Néanmoins, de nombreuses difficultés

conceptuelles subsistent que des physiciens et des philosophes continuent d'explorer. Pour certains, la physique quantique, dans son interprétation par l'école de Copenhague, est moins une théorie physique qu'un ensemble efficace de « recettes » pour calculer des résultats de mesures. Mais, comme le soulignait déjà Bell, cet ensemble de recettes n'en est pas moins, lui-même, problématique. Pourquoi l'observateur joue-t-il un rôle si important ? Pourquoi l'acte de la mesure provoque-t-il l'effondrement de la fonction d'onde en l'une de ses composantes ? Ou encore, pourquoi un système macroscopique ne manifeste-t-il jamais une superposition d'états ?

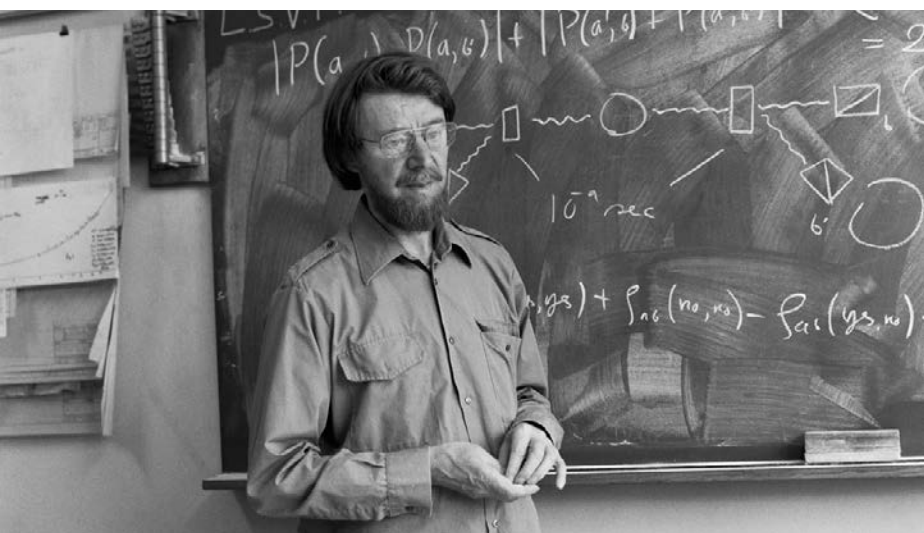
Depuis plusieurs décennies, les physiciens tentent de dépasser l'interprétation de Copenhague pour traiter ces difficultés. En explorant plusieurs pistes.

PLUSIEURS INTERPRÉTATIONS

Evoquons ici les quatre directions principales explorées pour résoudre les difficultés conceptuelles de la physique quantique. Une première approche reprend le principe des variables cachées, c'est-à-dire l'idée que la physique quantique est incomplète et qu'il existe des variables structurellement impossibles à mesurer. Pour être cohérente avec les phénomènes d'intrication (et donc avec les expériences d'Alain Aspect), la dynamique de ces variables doit bien sûr être non locale.

La meilleure des théories à variables cachées est la théorie de Broglie-Bohm, d'abord suggérée par le physicien français Louis de Broglie en 1927 sous le nom de théorie de l'onde pilote, en s'inspirant du principe de la dualité onde-corpuscule qu'il avait énoncé quelques années plus tôt. Elle a ensuite été précisée en 1952 par l'Américain David Bohm. Dans ce cadre, chaque particule est décrite par sa position dans l'espace et par une onde associée, qui est la variable cachée et qui guide le mouvement de la particule. Dans cette théorie, réaliste au sens d'Einstein, l'évolution est

L'intrication est une connexion étrange, sans équivalent dans le monde ordinaire



Le physicien John Bell a formulé les inégalités qui portent son nom, en 1964. Des expériences, notamment celles d'Alain Aspect et ses collègues au début des années 1980, ont montré que ces inégalités sont violées. Ce résultat implique que la théorie quantique est non locale.

continue sans effondrement de la fonction d'onde. L'indéterminisme quantique est alors simplement la manifestation de notre ignorance des variables cachées.

Une deuxième voie, particulièrement osée, est l'interprétation des mondes multiples, qui repose sur des idées publiées en 1956 par le physicien américain Hugh Everett. À chaque mesure, toutes les prédictions possibles se réalisent, mais dans des mondes différents. Il n'y aurait donc jamais d'effondrement de la fonction d'onde. La réalité serait beaucoup plus vaste que celle à laquelle nous avons accès. L'indéterminisme serait la manifestation de notre ignorance sur notre localisation dans cette réalité élargie : toutes les prédictions de la théorie seraient réalisées, mais nous occuperions une certaine « branche » de la réalité, de sorte que nous ne verrions qu'un seul des résultats parmi tous ceux *a priori* possibles.

Une troisième possibilité est que la physique quantique n'est pas cohérente en soi, car elle ne serait qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale à la dynamique complexe et non linéaire que nous n'avons pas encore directement observée. Cette dynamique est réalisable de différentes façons. Par exemple, les physiciens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber ont proposé en 1986 un mécanisme, dit de réduction dynamique, qui provoque de façon aléatoire l'effondrement de la fonction d'onde. Pour une particule individuelle, l'effondrement de la fonction d'onde serait un événement très rare, qui se manifesterait en moyenne une fois tous les milliards d'années. Mais sur un objet macroscopique contenant de l'ordre de 10^{23} particules, on aurait souvent des effondrements, de sorte qu'un état non superposé se dessinerait.

La quatrième possibilité, enfin, est la plus chère à l'un d'entre nous (Carlo Rovelli), qui l'a proposée en 1994. L'idée est de prendre la

physique quantique comme elle est, c'est-à-dire sans y ajouter de variables cachées et sans faire appel à des mondes multiples ou à une dynamique non observée. Les aspects apparemment paradoxaux de la théorie seraient engendrés par le fait qu'on oublie de tenir compte du caractère relatif de toutes les grandeurs physiques qui décrivent un système. Elles sont toujours définies relativement à un autre système physique (de la même façon que la vitesse d'un objet est définie seulement par rapport à un autre objet). Cette interprétation de la physique quantique, nommée interprétation « relationnelle », s'inspire de la relativité restreinte. Ainsi, si pour un observateur, un système est dans un seul état suite à l'effondrement de la fonction d'onde, il pourrait être encore dans une superposition d'états pour un autre observateur. Les états ne décrivent pas le système observé lui-même, mais une relation entre le système et l'observateur.

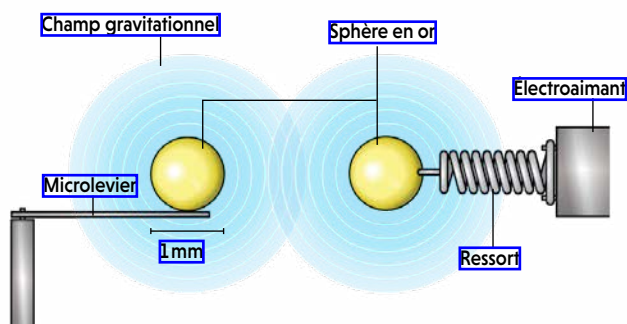
Ces quatre pistes pour mieux comprendre la physique quantique ont néanmoins toutes un coût conceptuel élevé : chacune exige de renoncer à quelque chose qui n'est pas facile à abandonner. La théorie de Broglie-Bohm se heurte à certaines difficultés quand on veut l'associer à la théorie de la relativité restreinte et demande d'accepter qu'une partie de la réalité est en principe inobservable. L'interprétation des mondes multiples demande d'imaginer qu'il y aurait une infinité inaccessible de couches de réalité, sans compter qu'il n'est pas aisé de relier ces mondes multiples à notre expérience. Les théories de réduction dynamique impliquent un phénomène d'effondrement spontané de la fonction d'onde que l'on n'a pas observé dans les expériences. L'interprétation relationnelle nous empêche de décrire le monde physique dans sa globalité : on peut seulement décrire une partie du monde par rapport à une autre.

L'ÉPREUVE DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Les discussions entre les théoriciens qui défendent l'une ou l'autre de ces pistes (ou d'autres encore) sont souvent très animées. Cela dit, comme le conseillait le physicien américain Richard Feynman : « Les lois plus générales de la physique admettent souvent des formulations et des interprétations très différentes ; mais un bon théoricien doit savoir les utiliser toutes, car nul ne sait laquelle se révélera la plus efficace. » Cette attitude est peut-être la plus recommandable vis-à-vis des difficultés conceptuelles de la physique quantique. Seule la suite de l'histoire pourra nous dire quelle est en définitive l'interprétation qui se montrera la plus efficace et utile. D'autant qu'il est un domaine d'étude qui permettrait de mettre à l'épreuve les différentes

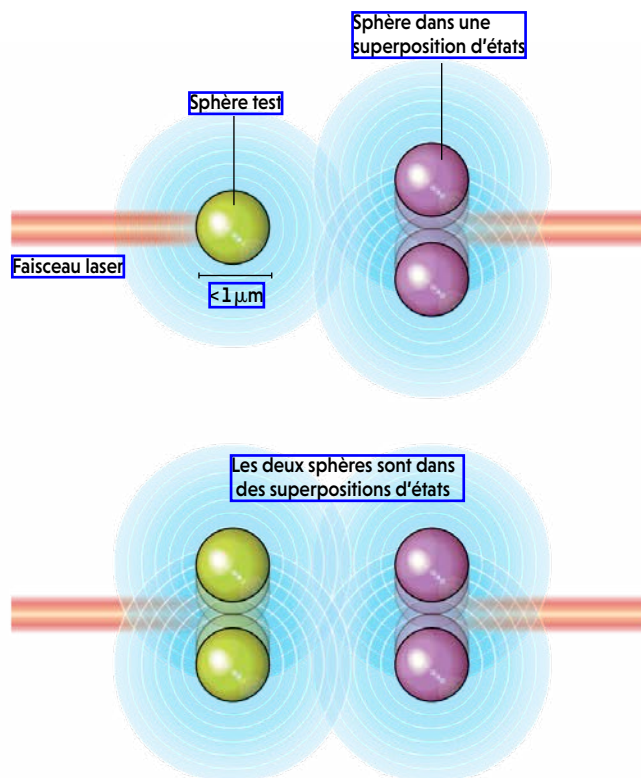
DES EXPÉRIENCES DE GRAVITÉ QUANTIQUE

Pour comprendre comment concilier la force gravitationnelle et la physique quantique, plusieurs équipes de physiciens conçoivent des expériences capables de mesurer des champs gravitationnels avec une précision extrême afin d'y déceler des comportements quantiques. Ils espèrent voir ainsi des particules dans des configurations de superposition quantique de deux positions différentes et des effets d'intrication.



UNE ÉTAPE PRÉLIMINAIRE : MESURER LE CHAMP GRAVITATIONNEL

Dans l'expérience proposée par le physicien Markus Aspelmeyer, l'idée est de mettre une sphère dans un état de superposition de deux positions spatiales différentes simultanées et de voir si le champ gravitationnel associé à cette masse est aussi séparé en deux. Pour observer de tels effets, il faut d'abord un dispositif capable de mesurer avec précision le champ gravitationnel de petits objets (ici des sphères en or). Dans cette expérience, un électroaimant couplé à un ressort fait vibrer une sphère. Par la seule force gravitationnelle, la seconde sphère, posée sur un microlevier (cantilever) similaire à ceux utilisés dans les microscopes à force atomique, devrait osciller. Les physiciens espèrent mesurer cet effet infime.



L'EXPÉRIENCE DE MARKUS ASPELMAYER

L'équipe mettra une sphère (violette) dans un état de superposition de deux positions grâce à un laser. Le champ gravitationnel de cette sphère sera alors aussi dans une superposition d'états et aura deux distributions spatiales. Comment la sphère test (verte) interagira avec ce champ ? L'interaction pourrait détruire la superposition d'états, ce qui serait un signe de la nature classique de la force gravitationnelle. Ou bien la superposition pourrait persister et conduire à un système intriqué des deux sphères, ce qui confirmerait la nature quantique de la force gravitationnelle.

interprétations de la physique quantique. C'est celui qui vise à construire une théorie quantique de la gravitation.

DEUX THÉORIES INCONCILIABLES ?

Au xx^e siècle, les chercheurs se sont rapidement aperçus que les deux grandes avancées de la physique, la physique quantique et la relativité générale, sont difficiles à concilier. Si, dans la plupart des cas, il est effectivement possible de ne considérer qu'une seule de ces théories, l'absence d'une théorie quantique de la gravitation nous empêche de comprendre certains phénomènes réels, comme ce qui se passe au cœur des trous noirs ou au début de l'Univers.

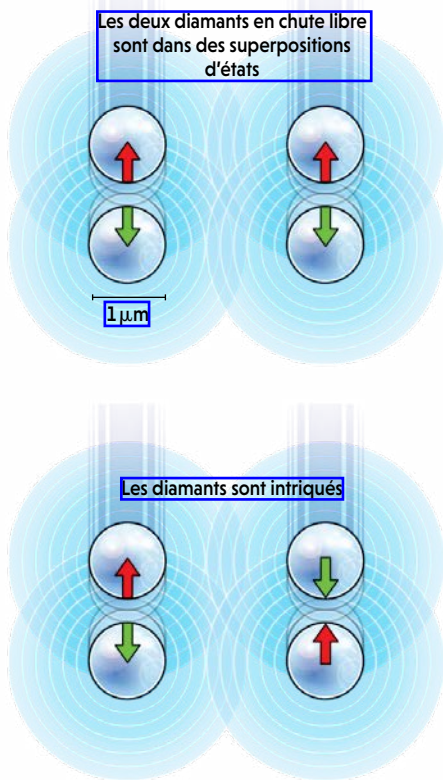
Les deux pistes les plus prometteuses pour élaborer une théorie de «gravité quantique» sont la théorie des cordes et celle de la gravitation quantique à boucles. Si la première suggère que les particules ne sont pas ponctuelles mais de minuscules cordes vibrantes, la seconde postule

que l'espace-temps lui-même est sujet à tous les phénomènes typiques de la physique quantique, avec la conséquence, en particulier, que l'espace ne serait pas continu, mais discrétisé : aires et volumes deviennent des grandeurs quantifiées, qui ne peuvent être arbitrairement petites.

Ces théories ont connu d'importants développements s'étendant parfois au-delà de la seule question de la gravité quantique, avec des retombées, par exemple, en mathématiques ou en physique de la matière condensée.

Il y a encore une dizaine d'années, les scientifiques pensaient que les phénomènes de gravitation quantique étaient hors de portée des expériences, de sorte qu'il était impossible d'obtenir le moindre indice empirique permettant d'en savoir plus sur la nature réelle de la gravité quantique. Or cette impression était en partie fautive, comme l'ont montré plusieurs expériences et observations récentes.

Au LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern, les physiciens accélèrent



UNE SECONDE EXPERIENCE: EN CHUTE LIBRE
Deux équipes (d'une part, Sougato Bose et ses collègues, d'autre part, Chiara Marletto et Vlatko Vedral) proposent d'essayer d'intriquer des électrons dans deux diamants en chute libre distants de 100 micromètres. Les particules n'interagiraient que par le champ gravitationnel des deux diamants. Une corrélation dans les propriétés des électrons confirmerait l'établissement de l'intrication et la nature quantique de la gravitation.

des protons à des vitesses proches de celle de la lumière pour les faire se percuter frontalement et ainsi produire des collisions à haute énergie d'où émergent des particules massives de très courte durée de vie. C'est ainsi qu'ils ont confirmé l'existence du boson de Higgs, en 2012, pièce jusque-là manquante du modèle standard de la physique des particules. Ce modèle, développé à partir des années 1960, décrit les particules fondamentales et leurs interactions, mais il ne tient pas compte de la gravitation et laisse ouvertes certaines questions théoriques.

Une grande partie de la communauté scientifique était convaincue, à partir d'arguments théoriques, qu'il était possible d'étendre de façon très simple et naturelle le modèle standard grâce à la supersymétrie (une symétrie hypothétique entre particules de spin entier et particules de spin demi-entier). Cette extension du modèle standard implique l'existence de nouvelles particules que l'on pensait être en

mesure de produire et d'observer au *LHC*. En outre, la théorie des cordes repose sur la supersymétrie et une détection de la supersymétrie au *LHC* aurait été une indication intéressante en faveur de cette théorie. Or une telle détection n'a pas eu lieu. Mais déjà, les scénarios supersymétriques les plus naturels ont été exclus. Dès lors, l'absence de supersymétrie au *LHC* n'est pas une bonne nouvelle expérimentale pour la théorie des cordes.

BEAUCOUP DE MODÈLES ONT ÉTÉ ÉLIMINÉS

La théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles ne sont pas les seules pistes pour une gravité quantique. D'autres ont été explorées et ont parfois été mises en grande difficulté par l'expérience. Par exemple, en 2009, Petr Hořava, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé un modèle de gravité quantique qui brise l'invariance de Lorentz, la symétrie mathématique par laquelle se traduit l'absence de référentiel privilégié en relativité restreinte.

Motivés par ces spéculations, les astronomes ont cherché les signes d'une brisure de l'invariance de Lorentz dans l'Univers, par exemple dans la mesure de la vitesse de rayons cosmiques. Les résultats ont été nets: non seulement on n'a trouvé aucune indication d'une brisure de cette invariance, mais celle-ci a été confirmée jusqu'à des échelles d'énergie supérieures à celles qui sont caractéristiques de la gravitation quantique. La gravité de Hořava et toute la classe de modèles prédisant une brisure de l'invariance de Lorentz sont ainsi mises en difficulté.

Depuis 2015, une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers s'est ouverte. La détection par les collaborations *Ligo* et *Virgo* d'ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, ont été une confirmation éclatante de la relativité générale. Mais elle a fait davantage. En 2017, une détection simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par la coalescence de deux étoiles à neutrons a montré que ces deux types d'ondes se propagent à la même vitesse (avec une très petite marge d'erreur). Ce résultat a mis en difficulté de nombreuses théories de gravité modifiée, concurrentes de la relativité générale. Celles-ci avaient été proposées pour expliquer certaines observations comme l'expansion accélérée de l'Univers ou la matière noire, mais elles prévoient souvent que la vitesse des deux types d'ondes doit être différente. Encore une fois, la nature nous indique que certaines directions de recherche n'étaient pas les bonnes. Ce qui n'empêche pas que, pour le savoir, il fallait tout de même les explorer.

Enfin, un résultat empirique important pour la gravité quantique vient de la cosmologie: la >

▢ mesure de l'expansion accélérée de l'Univers. Cette dynamique est bien décrite par les équations de la relativité générale quand elles incluent une constante, la « constante cosmologique », qui prend dans ce cas une valeur positive. Mais dans la théorie des cordes, cette constante est naturellement négative, en contradiction avec les observations. Des tentatives d'adapter la théorie des cordes à une constante cosmologique positive existent, mais restent très controversées. Les expériences qui tranchent de façon définitive sont rares en science : en général, les hypothèses gagnent ou perdent en crédibilité en fonction de l'accumulation d'indices vérifiés ou non. Le fait que la constante cosmologique soit de signe contraire à ce que la théorie des cordes avait indiqué affaiblit la confiance que l'on peut avoir en cette piste.

UNE VISION QUI SE PRÉCISE

Ces différents exemples de résultats observationnels et expérimentaux nous ont fait progresser sur ce que peut être la gravité quantique. Ainsi, les spécialistes de la théorie des cordes qui, dans les années 1980, pensaient résoudre rapidement le problème de la gravité quantique ont dû revoir leurs objectifs.

L'approche de la gravitation quantique à boucles a été moins ébranlée par ces données récentes. Cependant, les chercheurs travaillant sur cette piste sont moins nombreux et il faut encore fournir un effort considérable pour obtenir des prédictions quantitatives susceptibles d'être confrontées aux expériences.

En particulier, deux phénomènes concentrent une grande partie de l'attention des physiciens. D'abord, la théorie suggère que le Big Bang aurait été un « grand rebond » (*big bounce* en anglais), un résultat obtenu en 2007 par Martin Bojowald, aujourd'hui à l'université d'État de Pennsylvanie. Suivant cette idée, un préunivers aurait été en contraction, s'effondrant sur lui-même. Mais à cause du caractère discret de l'espace, lorsqu'une densité critique a été atteinte, un rebond aurait inversé la dynamique et renvoyé l'Univers en expansion. Le cosmos ne serait donc pas né d'une singularité de densité infinie.

Suivant une idée similaire, les trous noirs pourraient eux aussi « rebondir » en se transformant en « trous blancs » (des objets prédits par la relativité générale et encore non observés). L'un de nous (Carlo Rovelli) et ses collègues travaillent activement à déterminer des signatures observationnelles de ces rebonds, en particulier dans le fond diffus cosmologique (le rayonnement émis par l'Univers quand il n'avait que 380 000 ans) et dans les rayons cosmiques. Les éventuels trous blancs produits par des trous noirs primordiaux pourraient même être une composante de la mystérieuse matière noire.



Quelle que soit la formulation correcte de la théorie de la gravitation quantique, elle est, en tout cas... quantique ! Elle héritera donc des difficultés conceptuelles de la physique quantique, qui seront peut-être même exacerbées. Car ce ne sont pas seulement les particules qui pourront se trouver dans une superposition d'états ou en intrication, mais aussi la géométrie de l'espace-temps elle-même.

Sur la question de l'interprétation de la physique quantique la plus adaptée à la gravité quantique, comme on pouvait s'y attendre, les théoriciens sont divisés. L'idée des mondes multiples est populaire chez une partie des « cordistes », tandis que l'idée que la physique quantique révèle une structure relationnelle de la réalité a plutôt les faveurs des partisans de la théorie des boucles, historiquement plus proche de la relativité générale, laquelle a déjà un fort contenu « relationnel ».

Un petit nombre de théoriciens explorent aussi l'idée que la connexion entre les deux problèmes puisse être plus profonde. Par exemple, le physicien et mathématicien britannique

Les expériences d'Alain Aspect sur l'intrication quantique ont connu de nombreuses améliorations et variantes, dont certaines sont réalisées depuis l'espace. En 2017, un satellite chinois, *Micius*, a servi de source pour des particules intriquées émises vers deux observatoires distants de 1200 kilomètres.

La gravitation quantique héritera des problèmes conceptuels de la physique quantique

BIBLIOGRAPHIE

A. Tilloy, Et si la gravité n'était pas quantique ?, Pour la Science, n° 495, janvier 2019.

F. Laloe, Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?, EDP Sciences/CNRS Éditions (2^e édition), 2018.

S. Bose et al., A spin entanglement witness for quantum gravity, Phys. Rev. Lett., vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. Ghirardi, Collapse theories, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, E. N. Zalta (ed.), 2016.

C. Rovelli, Par-delà le visible : la réalité du monde physique et la gravité quantique, Odile Jacob, 2015.

Roger Penrose a suggéré que la réduction dynamique puisse être un phénomène d'origine gravitationnel. Cette idée repose sur un fait étrange et intrigant : l'échelle de longueur naturellement associée à la gravitation quantique (la «longueur de Planck») est extrêmement petite et l'échelle d'énergie (l'«énergie de Planck») est extrêmement grande, mais l'échelle de masse naturellement associée à la gravitation quantique (la «masse de Planck») est de l'ordre du microgramme, valeur curieusement proche de celle qui distingue les systèmes «petits» (où les effets quantiques sont manifestes) des systèmes «grands», au comportement classique, non quantique. S'agit-il d'une coïncidence ou de l'indice d'un lien profond entre la gravitation et le problème de l'interprétation de la physique quantique? Nous ne le savons pas encore.

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'EXPÉRIENCES

Des indices utiles pourraient venir d'expériences en laboratoire qui sont à l'étude et seront peut-être réalisées dans un futur proche. Trois équipes ont ainsi récemment proposé des protocoles qui mettront à l'épreuve la nature quantique de la force gravitationnelle (voir l'encadré page 34). Le groupe autour de Markus

Aspelmeyer, de l'université de Vienne, en Autriche, et Sugato Bose, de l'University College, à Londres, et indépendamment Chiara Marletto et Vlatko Vedral, de l'université d'Oxford, ont proposé des expériences capables de mettre en évidence une superposition quantique de deux géométries différentes de l'espace-temps.

L'idée est d'observer l'intrication quantique de deux particules après avoir mis chacune d'elles dans une configuration qui serait la superposition quantique de deux positions différentes. L'intrication serait alors causée par la superposition quantique de deux versions de la géométrie de l'espace-temps, dues aux différentes positions des particules.

Si l'expérience devait montrer que l'espace-temps ne peut pas se mettre dans une superposition quantique d'états, cela indiquerait une relation nouvelle et profonde entre gravitation et quantique, peut-être le long des idées suggérées par Roger Penrose. Si, au contraire, dans le cas que nous pensons le plus probable, l'effet d'intrication est observé, alors celui-ci témoignerait que notre monde n'est pas dessiné sur la toile d'un espace-temps donné : il serait lui-même sujet aux mystères de la physique quantique. ■

Direction des relations avec les entreprises

cnrs
formation
entreprises

**Organisme
de formation continue**



**250 formations technologiques courtes proposées
par le CNRS dans ses laboratoires de recherche**

pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens



Domaines de formation

Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, urbanisme, enjeux sociétaux... et plus encore

+ de 1600 stagiaires en 2018



Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes

**Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr**



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

[@CNRS_CFE](https://twitter.com/CNRS_CFE)

PASCALE SENELLART-MARDON

est directrice de recherche au CNRS et chercheuse en nanophotonique au Centre de nanosciences et de nanotechnologies du CNRS et de l'université Paris-Saclay. Avec deux ex-étudiants, elle a cofondé la société Quandela qui produit des sources de photons uniques pour l'ordinateur et les communications quantiques, dispositif qui a valu à cette start-up le grand prix i-Lab 2018, concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes.



L'ordinateur quantique devient un enjeu politique

Depuis plus de vingt ans, l'idée d'ordinateurs opérant sur des bits quantiques et non classiques, qui permettraient de faire des calculs aujourd'hui impossibles, stimule les imaginations et les recherches. S'est-on rapproché de l'objectif? Le point avec Pascale Senellart-Mardon, physicienne à la frontière de la recherche fondamentale et de la technologie.

Pouvez-vous nous rappeler ce qu'est un ordinateur quantique ?

C'est une machine «intriquante», c'est-à-dire un dispositif qui exploite la possibilité de superposer et d'intriquer les états quantiques de plusieurs systèmes physiques – c'est-à-dire de les lier de façon très étroite, spécifique à la physique quantique – afin de mettre en œuvre des calculs hors de portée des ordinateurs actuels.

D'où vient la puissance calculatoire particulière que vous évoquez ?

Pour le faire ressentir, j'aime bien utiliser cette métaphore : rechercher la solution d'un problème revient à essayer de faire traverser un labyrinthe complexe par un personnage.

Si c'est un ordinateur classique qui aide ce personnage, il lui fera, à chaque embranchement, essayer toutes les voies, rebrousser chemin au bout de chaque cul-de-sac, puis recommencer jusqu'à trouver la sortie. Il se peut que, par chance, le personnage trouve vite comment traverser, mais il se peut aussi qu'il meure avant que l'exploration systématique ne lui ait révélé la sortie du labyrinthe...

Si c'est un ordinateur quantique qui assiste le personnage, il le «superposera», à chaque embranchement, à un *alter ego* qui explorera l'autre voie. En d'autres termes, on aura simultanément l'état représenté par le personnage allant à gauche et l'état d'un *alter ego* allant à droite. Résultat : en une passe, l'ordinateur quantique fait essayer en parallèle toutes les voies au personnage. Il construit ainsi un état qui superpose tous les états d'*alter ego* effectuant tous les parcours possibles, y compris celui qui permet de traverser. Un témoin présent à la sortie permettra alors d'extraire, parmi la multitude d'*alter ego*, celui qui aura traversé le labyrinthe – autrement dit la solution au problème posé.

Cela revient en somme à une forme de parallélisme massif...

Exactement, un parallélisme massif et inhérent à une propriété subtile du monde quantique : l'existence d'états qui sont des superpositions de plusieurs états quantiques de base d'un certain système physique. Une autre façon de paralléliser consiste à «intriquer» l'état d'un système physique avec celui d'un autre, l'intrication étant un lien spécifiquement quantique, qui subsiste quelle que soit la distance séparant les deux systèmes. J'insiste sur un point : puisqu'il fonctionne sur un principe différent, l'ordinateur quantique ne remplacera pas l'ordinateur classique, mais il le complétera quand un problème sera hors de sa portée...

Quels types de problèmes dépassent l'ordinateur classique ?

Si nous disposions d'un ordinateur quantique, nous pourrions, de manière générale, résoudre

bien plus vite tous les problèmes d'optimisation, ceux où il faut rechercher une solution parmi un très grand nombre de possibilités. Par exemple, cette capacité pourrait nous aider à développer bien plus vite des molécules thérapeutiques, à réaliser des simulations pour trouver enfin la formule d'un supraconducteur à vraiment haute température, à faire de meilleures prévisions météorologiques, à optimiser les investissements financiers, etc.

Mais l'exemple emblématique est un problème arithmétique : avec un ordinateur quantique, on pourrait décomposer un très grand nombre en ses facteurs premiers beaucoup plus vite. Cela bouleverserait la cryptographie, puisque la sécurité du chiffrement RSA, le plus utilisé aujourd'hui, repose sur l'impossibilité, avec un ordinateur classique, d'effectuer la même tâche en un temps raisonnable.

Et où en sommes-nous ? Quels sont les obstacles à surmonter pour construire un ordinateur quantique ?

Vaste question ! Disons pour commencer que les théoriciens qui développent l'algorithmique quantique supposent de pouvoir disposer d'un certain nombre de bits quantiques, ou qubits (pour *quantum bits*). Un qubit est l'équivalent concret du personnage superposable que j'évoquais plus haut. Un bit classique ne peut valoir que 0 ou 1. Un qubit, lui, a deux états de base notés $|0\rangle$ et $|1\rangle$, et il peut être dans une superposition des deux, c'est-à-dire dans un état de la forme $a|0\rangle + b|1\rangle$. Ensuite, l'étape de calcul va créer des liens d'intrications multiples entre différents qubits, liens qui contribuent au parallélisme et permettent d'aboutir au résultat très efficacement.

Un ordinateur quantique consiste donc en un étage constitué d'un ensemble de qubits et en un étage qui effectue un calcul ?

Oui, comme dans un ordinateur classique, dans un ordinateur quantique, le calcul suppose l'assemblage d'un certain nombre de portes logiques, mais les portes logiques quantiques intriquent les qubits entre eux... Aujourd'hui, la difficulté technique essentielle à franchir pour obtenir un ordinateur quantique est triple : 1) disposer d'un grand nombre de qubits ; 2) parvenir à les combiner en des états intriqués ; 3) maintenir la cohérence de ces états assez longtemps pour que les calculs puissent aller à leur terme.

Ainsi, il faut d'abord avoir des qubits. Par quelles techniques y parvient-on ?

Il en existe de l'ordre d'une vingtaine, je crois, mais quatre filières font l'objet d'un développement intense. La plus avancée est celle des ions piégés, dans laquelle deux groupes mènent la course en tête : celui de Rainer Blatt, à

➤ L'université d'Innsbruck, en Autriche, et celui de Chris Monroe, à l'université du Maryland, aux États-Unis.

La technologie des ions piégés est la mise en pratique de nos anciennes expériences de pensée de physique quantique: on réalise des dispositifs où des champs électriques et magnétiques piègent des ions disposés en série les uns à côté des autres; chaque ion, *via* l'état d'énergie d'un électron, constitue un qubit. Une impulsion laser appropriée permet de modifier l'état électronique d'un ion, pour en faire une superposition des états $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Ensuite, l'enjeu est de construire des portes logiques quantiques qui, en pratique, intriquent les états des ions entre eux en jouant sur leurs fréquences d'oscillation dans leur piège commun.

Cette filière est très avancée puisque, pour faire des calculs, on dispose de temps de cohérence de quelques minutes, ce qui est très long. En théorie, cela permet d'empiler beaucoup de portes logiques... ce qui veut dire beaucoup d'opérations.

Combien de qubits contiennent les ensembles d'ions piégés que l'on a obtenus ainsi?

Des annonces tapageuses dans les médias ont fait état de 70 qubits, mais seul est pertinent le nombre de qubits que l'on peut combiner tout en maintenant la cohérence quantique assez longtemps pour réaliser un calcul. De ce point de vue, le bon chiffre serait plutôt entre une quinzaine et une vingtaine... ce qui est aussi vrai des autres filières avancées d'aujourd'hui, que celles-ci exploitent des atomes ou des atomes artificiels.

Des atomes artificiels? C'est-à-dire?

Dans la filière des ions piégés, les qubits sont des états d'énergie d'électrons atomiques. Dans les autres filières dominantes, il s'agit aussi d'états d'énergie d'électrons, mais d'électrons liés à des «atomes artificiels», c'est-à-dire à de petits dispositifs microscopiques conçus pour lier une telle particule. Dans deux des autres filières, par exemple, les électrons sont liés soit au sein de petites boucles de courant en milieu supraconducteur, soit au sein de «boîtes quantiques» réalisées dans du silicium – de minuscules structures où l'électron est confiné.

Tandis que Google et IBM mènent la danse dans la première filière, des équipes des Pays-Bas, d'Australie et des États-Unis la mènent dans la deuxième. Des chercheurs du CEA et du CNRS à Grenoble s'y sont aussi lancés en 2016. Bref, dans ces filières, on a reconstitué au sein d'atomes artificiels l'équivalent d'une échelle des états d'énergie d'électrons atomiques. La très grande subtilité technique de la construction et du maintien en cohérence

des superpositions d'états en milieu solide a limité jusqu'à présent le nombre de qubits atteint: il est d'environ 20 dans le cas des dispositifs supraconducteurs, et de 2 dans le cas des boîtes quantiques en silicium...

Seulement 2? Pourquoi alors poursuivre dans cette voie?

Ce nombre modeste de qubits du côté du silicium reflète le grand défi à relever pour que cette technologie soit viable: trouver le moyen d'augmenter le nombre de qubits intriqués. Pour autant, comme cette filière s'appuie sur la technologie CMOS qui sert à produire les microprocesseurs actuels, son potentiel industriel est grand et il est donc important de l'explorer. Si l'on parvenait à intriquer un grand nombre de qubits réalisés en semi-conducteurs, on aurait toute facilité pour les produire par millions...

Mais les intriquer en grand nombre ne suffit pas; ne faut-il pas aussi réussir à conserver la cohérence des états correspondants?

Oui, il y a aussi un défi du côté de la cohérence, comme dans tout système à l'état solide, mais le défi est aussi du côté de la «connectivité», c'est-à-dire la capacité à intriquer des qubits qui sont distants les uns des autres. Pour l'instant, l'état de l'art avec le silicium consiste à intriquer une boîte quantique avec sa plus proche voisine seulement!

Il faut maintenir la cohérence quantique assez longtemps pour réaliser un calcul

Existe-t-il une autre filière où l'on peut espérer intriquer un grand nombre de qubits sans perdre trop rapidement leur cohérence?

La mienne, peut-être, qui est celle de l'ordinateur quantique optique. Dans cette voie, les qubits sont par exemple les états de polarisation de photons uniques, photons que l'on combine en les introduisant simultanément à l'entrée d'un circuit optique effectuant le calcul. Les portes logiques quantiques peuvent être réalisées à base de miroirs, de lames



semi-transparentes, c'est-à-dire de séparateurs de faisceau et autres déphaseurs, le tout relié à des détecteurs *via* un réseau de fibres optiques. Or les états photoniques peuvent voyager très loin sans perdre leur cohérence; donc, si l'on parvient à éviter les pertes, on peut réaliser un grand nombre de portes logiques. Et, ce qui ne gâche rien, les ordinateurs quantiques optiques sont évidemment compatibles avec les réseaux de communication optique.

Tout semble donc aller pour le mieux dans ce monde photonique ?

Sauf qu'il y a une difficulté de taille... Lorsqu'on effectue un calcul, il existe une probabilité élevée de n'aboutir à aucun résultat. Cela tient au principe des portes logiques qui utilisent des séparateurs de faisceau. Comme, à chaque séparateur, les photons intriqués ont 50% de chance de ne pas être transmis par la voie qui, après beaucoup d'autres embranchements, mènera au détecteur, il se peut qu'aucun signal ne sorte. Pour reprendre l'image de tout à l'heure, tout se passe comme si l'étage de calcul était un labyrinthe dont la traversée résout un problème difficile, mais qu'à chaque embranchement, le candidat perd la moitié de sa substance – de son intensité lumineuse utile – quand

La société IBM construit les premiers ordinateurs quantiques à base de circuits supraconducteurs, le dernier en date étant le Q System One (*ci-dessus*), qui a 20 qubits. IBM propose par ailleurs une plateforme en ligne où ses utilisateurs peuvent y faire fonctionner des processeurs quantiques de quelques qubits. L'objectif de cette initiative est d'accumuler de l'expérience dans l'exécution d'algorithmes afin d'explorer les possibilités de l'informatique quantique.

il se dédouble en un état superposé de son *alter ego* et de lui-même... Autrement dit, au bout d'un moment, on va perdre trop de lumière pour parvenir à faire le calcul.

La probabilité d'avoir un signal en sortie diminue donc avec le nombre de portes logiques. C'est un obstacle sérieux...

Oui, mais nous avons des solutions pour affronter cette difficulté. Des théoriciens ont trouvé d'autres moyens de faire des calculs à grande échelle: on ne partira plus d'états à un photon, mais, pour limiter le nombre de portes logiques, d'états intriqués à plusieurs photons. Cette autre façon de calculer repose sur une autre architecture de calcul quantique, dite «fondée sur la mesure».

Finalement, cette filière de l'ordinateur quantique et optique est-elle prometteuse ?

Elle a semblé au point mort pendant longtemps, parce que pour produire les états superposés de départ, il faut des sources de photons à la fois uniques – arrivant seuls – et absolument identiques – de même fréquence. Or les sources dont nous disposions dans le passé étaient si peu efficaces qu'il fallait pratiquement deux ou trois ans, le temps d'une thèse de doctorat, avant de parvenir à exécuter un petit calcul. ▢

Et pourquoi la situation a-t-elle changé ?

Parce que mon équipe au Centre de nanosciences et de nanotechnologies a réussi à mettre au point un petit composant presse-bouton, qui peut émettre à volonté des photons un par un. Pour aller vite, nous avons mis une boîte quantique – un atome artificiel donc, où un électron ne peut occuper que certains niveaux d'énergie – à l'intérieur d'une cavité optique. Comme pour tous les atomes, si on excite cet atome artificiel, il va en se désexcitant émettre un seul photon, mais dans une direction quelconque. Ici, la cavité et les miroirs qui la constituent ont été choisis de telle façon qu'ils augmentent la probabilité que la lumière se concentre dans une direction donnée. En d'autres termes, grâce à la cavité, on contrôle l'«émission spontanée» de l'atome.

Sans cavité optique, tout se passe comme si l'énergie lumineuse émise par l'atome artificiel sortait d'une grande baignoire par une infinité de petits trous. Avec la cavité optique, on ajoute en pratique un énorme trou dans la baignoire... et naturellement la majorité de l'énergie lumineuse va maintenant s'écouler par ce trou. Il nous suffit alors de la collecter, avec une fibre optique. Notre «baignoire», les miroirs qui la constituent et la boîte quantique qu'elle contient forment une petite structure monolithique en semi-conducteur de 20 micromètres de diamètre (voir la photo ci-contre).

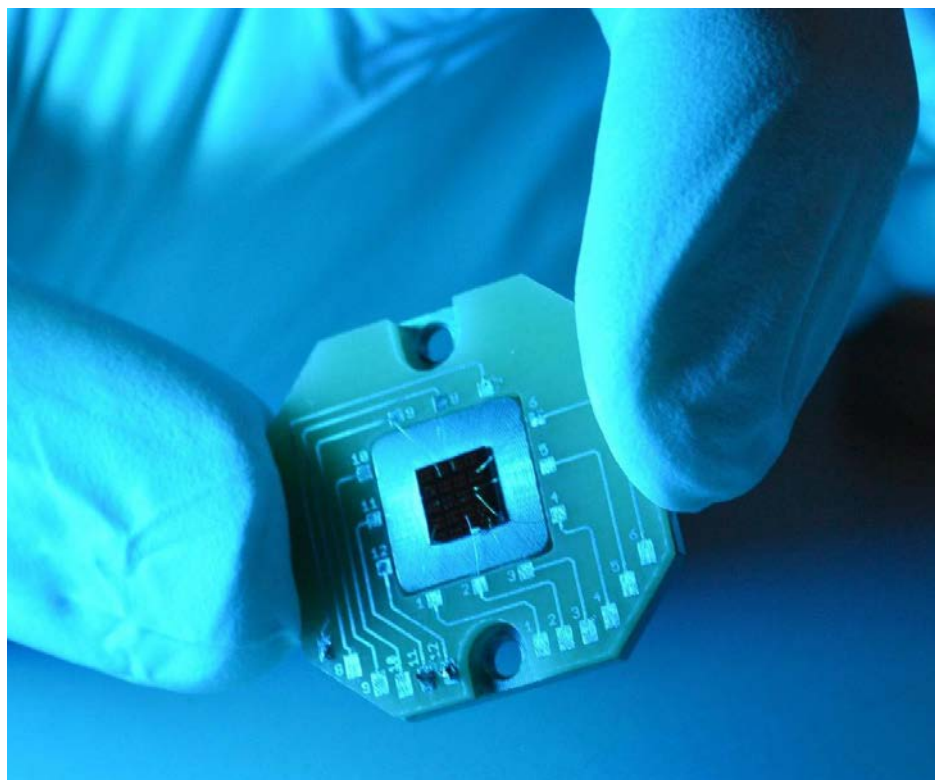
Ce qui a relancé la voie optique ?

Oui. En 2016, nous avons publié dans la revue *Nature Photonics* un article qui a eu un grand impact, puisqu'en deux ans, il a été cité plus de 400 fois. Depuis, nous sommes assaillis de demandes de chercheurs qui veulent utiliser nos sources de photons uniques pour faire du calcul quantique...

Comment réagissez-vous à cette situation ?

Comme nous ne pouvions pas faire face à toutes les demandes, avec Valérian Giesz et Niccolo Somaschi, nous avons créé la société Quandela. Mon rôle au CNRS consiste à faire de la recherche, et non à fabriquer des sources pour tous les chercheurs du monde qui en ont besoin. Maintenant, grâce à Quandela, nous pouvons leur fournir des sources qui, par rapport aux anciennes, réduisent le temps de calcul d'un milliard pour neuf qubits, c'est-à-dire ici neuf photons... Nous en avons déjà vendu en Australie, mais nous avons aussi des collaborations avec des chercheurs qui viennent dans notre laboratoire avec leur puce optique pour effectuer des calculs.

Si je comprends bien, l'aspect matériel de l'ordinateur quantique en est encore à ses débuts, bien que l'on progresse. Et pour l'aspect logiciel ? Existe-t-il déjà



des algorithmes ou des programmes pour ordinateurs quantiques ?

Les recherches dans ce domaine ont très longtemps été une activité de physiciens d'un côté, et de théoriciens faisant de l'algorithmique quantique de l'autre. Actuellement, quelque chose de nouveau apparaît : des informaticiens spécialistes des algorithmes commencent à envisager la programmation d'ordinateurs quantiques. Corrélativement, de grandes entreprises essaient de les encourager : cette année, au CES de Las Vegas, le plus grand salon d'électronique grand public du monde, IBM a ainsi présenté Q System One, un système à 20 qubits mis sur le réseau (voir la photo page précédente). Contre un abonnement onéreux, les gens qui s'intéressent au développement de logiciels quantiques peuvent s'en servir pour tester des algorithmes... La société Atos, en France, a une autre approche : en préparation de l'avènement du calcul quantique, elle a dédié un gros ordinateur classique à la simulation d'un ordinateur quantique, ce qui permet aussi de s'habituer aux calculs quantiques, de repérer les erreurs les plus dommageables, d'étudier la façon dont les utilisateurs s'y prennent...

L'Union européenne a lancé fin 2018 un « Quantum Flagship », un programme phare sur l'ordinateur et le calcul quantique. Un tournant pour la recherche européenne ?

Ce programme va financer à hauteur d'un milliard d'euros sur dix ans des projets pour

Ce dispositif commercialisé par la société Quandela émet à intervalles de temps réguliers quelque dix millions de photons infrarouges par seconde, tous identiques. En utilisant ces sources, on peut générer des jeux de photons, chacun d'eux constituant un qubit, puis les introduire au sein de circuits optiques afin d'effectuer un calcul quantique.

BIBLIOGRAPHIE

B. Zygelman, **A First Introduction to Quantum Computing and Information**, Springer, 2018.

P. Senellart et al., **High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources**, *Nature Nanotechnology*, vol. 12, pp. 1026-1039, 2017.

M. A. Nielsen et I. L. Chuang, **Quantum Computation and Quantum Information**, Cambridge University Press, 2010.

D. Mermin, **Calculs et algorithmes quantiques**, EDP Sciences et CNRS Éditions, 2010.

développer l'ordinateur quantique, les simulateurs, les communications et les capteurs quantiques, tout en maintenant un effort de recherche fondamentale. Cet investissement financier n'est finalement pas énorme, si l'on songe que la somme va se répartir sur l'ensemble de la communauté européenne. L'attribution des financements est démocratique, ce qui a du bon, mais cela empêche de concentrer l'investissement dans les projets les plus avancés. Personnellement, pour le moment, j'ai demandé dans ce cadre le financement de deux projets de recherche, mais je n'ai rien obtenu... Je n'ai pas été assez convaincante.

Il semble donc que la cavalerie européenne arrive, sans trop se presser... Comment cela se passe-t-il ailleurs ?

Je connais par exemple le cas des Chinois. En 2017, ils ont déjà secoué la communauté quantique internationale en mettant en œuvre une communication quantique depuis un satellite, alors que l'idée de faire cela avait été poussée en Europe, notamment par Anton Zeilinger, de l'université de Vienne. Les Chinois déploient déjà un réseau de communications quantiques sur des milliers de kilomètres. Au fil de nos progrès sur les sources de photons uniques, qui nous ont permis de relancer les travaux sur l'ordinateur optique, des équipes chinoises se sont engouffrées dans cette filière. Elles avancent extrêmement vite, sont fortes, ont de gros effectifs et n'ont apparemment pas de limites aux moyens qu'elles peuvent demander... Depuis peu, le chef de l'une de ces équipes explique dans les conférences que la Chine va démontrer l'avantage d'un ordinateur quantique par rapport aux plus gros calculateurs classiques grâce la technologie optique. Clairement, les Chinois ont mis un grand coup d'accélérateur sur les technologies quantiques.

Pour autant, l'ordinateur quantique est-il un objectif réaliste ? Pensez-vous que l'on arrivera

à intriquer des millions de qubits et que l'on saura maintenir la cohérence quantique assez longtemps pour effectuer de gros calculs ? Certains physiciens éminents, le Prix Nobel Serge Haroche notamment, ont déjà avancé l'idée que cela pourrait rester une utopie...

Comme tous les physiciens qui travaillent à maîtriser les effets quantiques subtils – l'intrication, la décohérence – pour rendre possible le calcul quantique, je vois l'énormité des obstacles à franchir et ils m'intimident. Quand j'y pense, j'ignore ce qui va se passer. Mais ça, c'est de la pensée linéaire, alors que nous sommes, avec tout ce qui est technologique, dans un domaine non linéaire, où l'on avance par des ruptures, comme l'illustrent les progrès permis par nos nouvelles sources de photons uniques.

Vos confrères pensent-ils comme vous ?

En 2015, j'ai participé aux États-Unis à un séminaire de réflexion sur la construction des futurs réseaux quantiques, où étaient invités des physiciens développant comme moi les composants quantiques, des théoriciens des réseaux quantiques et des gens des grandes entreprises de télécommunication, qui ont vécu la révolution de l'Internet à haut débit. Quand ils nous ont entendus rivaliser de prudence en évoquant nos difficultés pour avancer, leur message a été : « Mais arrêtez de vous prendre la tête ! Vous verrez. » De fait, même si l'on m'avait dit il y a dix ans que mon domaine ressemblerait à ce qu'il est aujourd'hui, je n'y aurais pas cru. Si l'on se rappelle où en étaient les télécommunications dans les années 1960, quand des opératrices connectaient les gens à l'aide de fiches dans des standards téléphoniques, est-ce que quelqu'un de cette époque aurait cru qu'aujourd'hui nous aurions tous à la main un petit ordinateur supercommunicant, capable de télécharger sans contact des films en quelques secondes, de synchroniser son horloge, de se connecter à un réseau mondial appelé Internet, de faire calculer à distance un trajet, de payer, etc. ?

Nous pouvons donc croire aux ordinateurs quantiques ?

Comment dire ? Le chemin que nous avons suivi pour aller du stade où nous en étions à l'époque des communications par sémaphores, au XVIII^e siècle, à celles de notre quotidien a aussi été une succession de promesses faites, d'échecs à les satisfaire, puis d'inventions d'alternatives ouvrant sur de nombreuses possibilités auparavant insoupçonnées. J'ai l'impression que dans la quête de l'ordinateur quantique, la même chose se passe... à un rythme effréné. ■

Les équipes chinoises avancent très vite pour démontrer l'avantage de l'ordinateur quantique

Propos recueillis
par François Savatier

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

Depuis que, il y a cent soixante ans, Darwin a posé les bases de la théorie de l'évolution, celle-ci n'a cessé d'évoluer. Au départ construite à partir de descriptions de zoologie, botanique et paléontologie, elle s'est peu à peu rapprochée de la génétique, de l'embryologie et, plus récemment, de la génomique, de l'épigénétique et même de l'écologie. Chaque discipline a ouvert de nouveaux horizons, révélant un matériel génétique très dynamique, bien plus qu'on ne le pensait. Brassage génétique, dérive aléatoire, transfert de gènes, transposons, contrôle épigénétique, influence de l'environnement... dessinent le nouveau visage de la théorie de l'évolution.

Le nouveau visage de la théorie de l'évolution

L'ESSENTIEL

> Au milieu du xx^e siècle, les résultats majeurs de la génétique ont servi à bâtir un cadre conceptuel explicatif de l'évolution biologique telle que décrite par la zoologie, la botanique et la paléontologie : la théorie synthétique de l'évolution.

> Au fur et à mesure des avancées, en particulier avec

l'émergence de la biologie moléculaire, ce cadre s'est considérablement enrichi.

> Depuis une dizaine d'années, certains biologistes souhaitent une « synthèse évolutive étendue ». L'intégration de nouvelles disciplines comme l'évo-dévo ou l'épigénétique paraît amplement justifiée.

L'AUTEUR

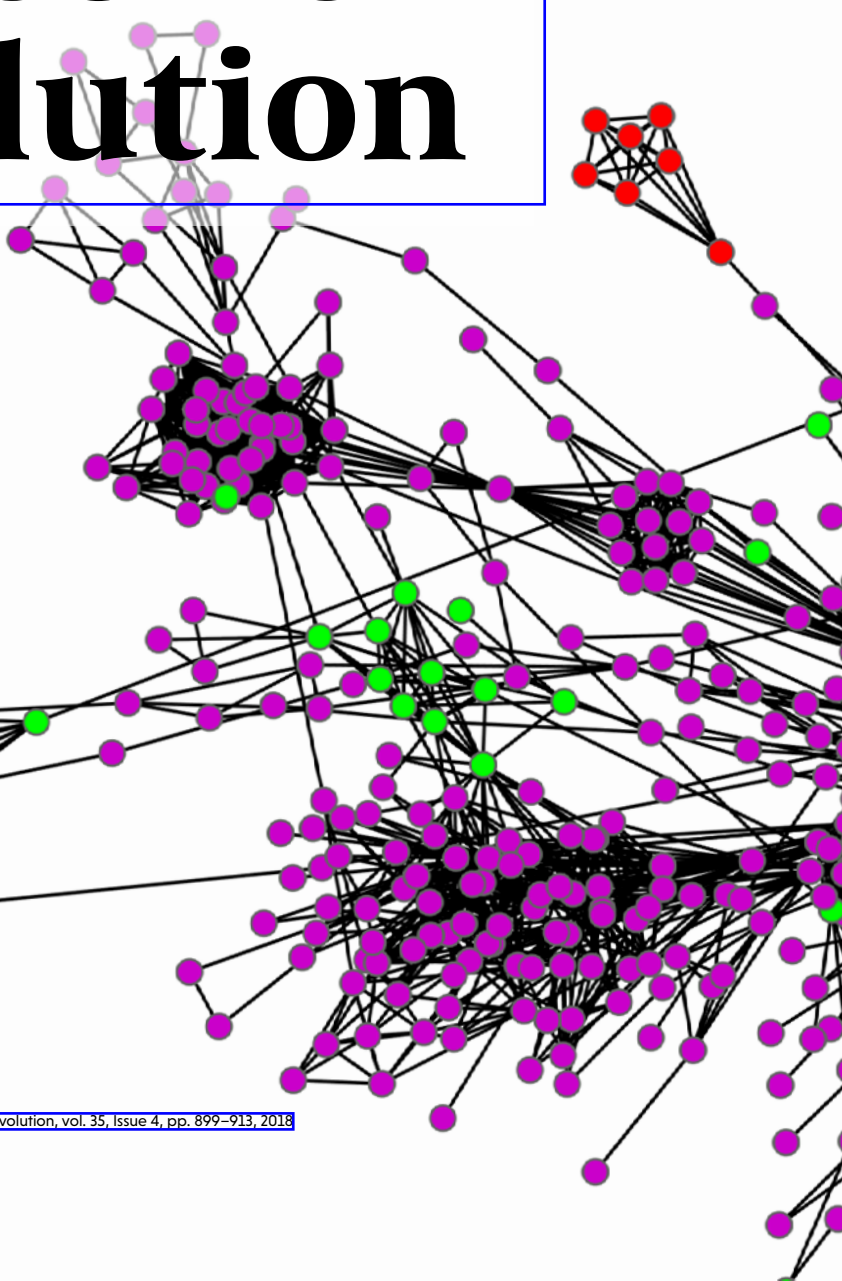


HERVE LE GUYADER
professeur émérite de biologie évolutive à Sorbonne Université, à Paris

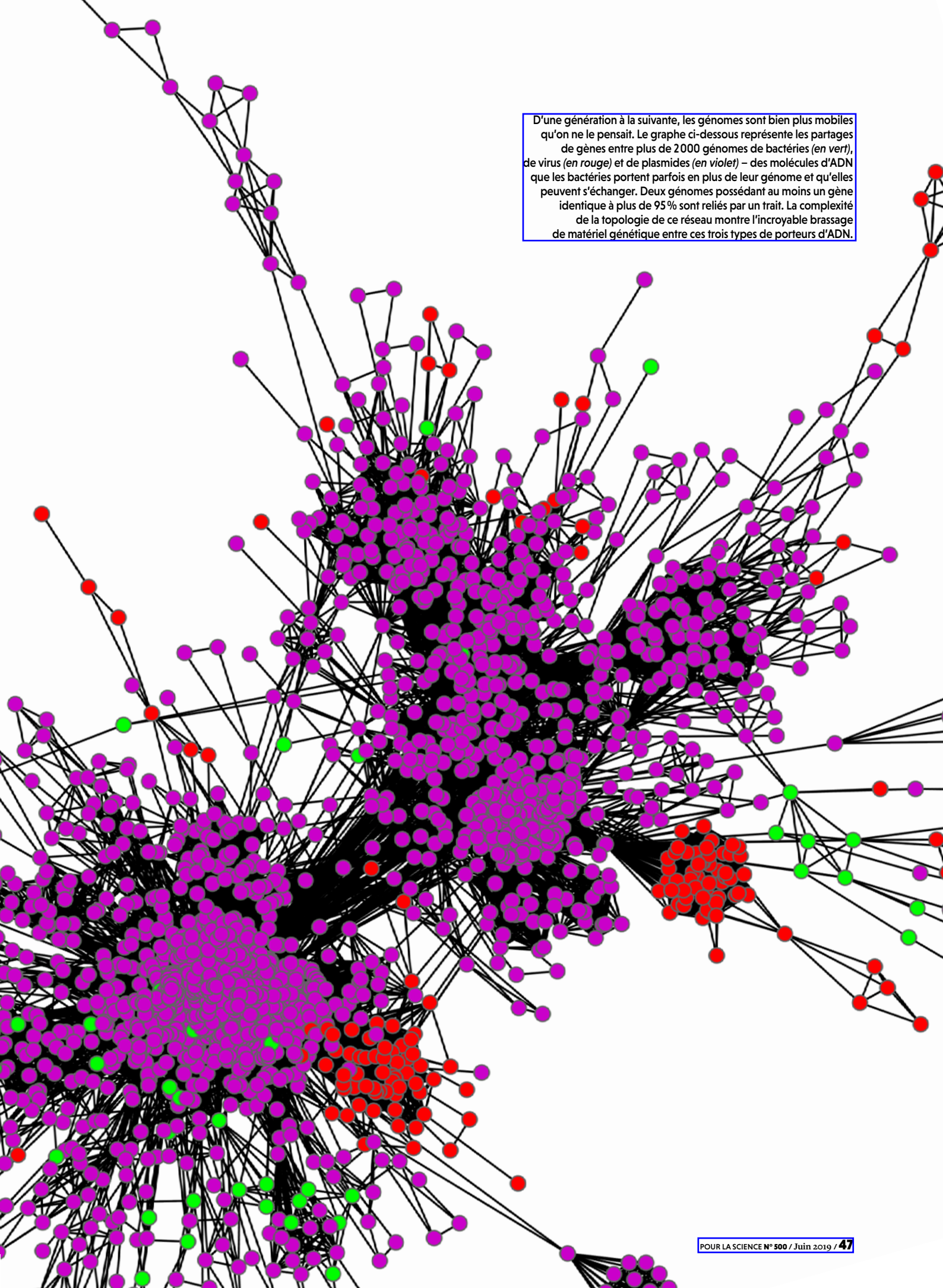
Les mutations de la théorie de l'évolution

La théorie de l'évolution ne cesse d'évoluer depuis sa première formulation par Darwin, en 1859. Aujourd'hui, on s'aperçoit que d'un organisme à un autre, d'une génération à la suivante, le matériel génétique varie d'une façon que l'on ne soupçonnait pas il y a peu. Gigantesque Lego où tout est modulaire, il donne prise à la sélection naturelle... ou non.

© UMR 7138 CNRS-Sorbonne Université, d'après E. Corel et al., Molecular Biology and Evolution, vol. 35, Issue 4, pp. 899-913, 2018



D'une génération à la suivante, les génomes sont bien plus mobiles qu'on ne le pensait. Le graphe ci-dessous représente les partages de gènes entre plus de 2000 génomes de bactéries (en vert), de virus (en rouge) et de plasmides (en violet) – des molécules d'ADN que les bactéries portent parfois en plus de leur génome et qu'elles peuvent s'échanger. Deux génomes possédant au moins un gène identique à plus de 95 % sont reliés par un trait. La complexité de la topologie de ce réseau montre l'incroyable brassage de matériel génétique entre ces trois types de porteurs d'ADN.



« Rien n'a de sens en biologie, si ce n'est à la lumière de l'évolution », en version originale: *Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution*. C'est par cet essai au titre devenu célèbre qu'en 1973, le généticien américain Theodosius Dobzhansky, un des fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution, a répondu aux attaques créationnistes de l'époque. Plus de quarante ans plus tard, cette phrase est plus que jamais d'actualité. Comme la génétique, la théorie de l'évolution a envahi toutes les disciplines de la biologie, des plus anciennes, comme la classification, aux plus récentes, comme la génomique; décrypter un génome ne peut se faire que par les outils issus de la biologie évolutive. Enfin, de nombreuses applications, que ce soit en génétique humaine ou en lutte biologique, en découlent.

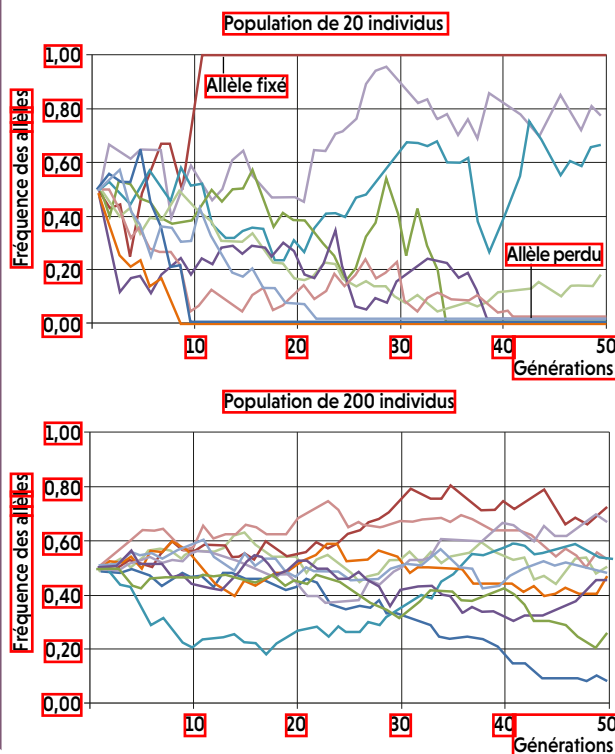
Notre vision de la théorie de l'évolution, cependant, a elle-même bien évolué ces dernières décennies, et Dobzhansky serait sans doute surpris. Le génome est beaucoup plus fluide qu'on ne le pensait: il subit au fil des générations bien plus de modifications que de simples mutations ponctuelles. Même la sélection naturelle est tombée de son piédestal: elle n'est plus le seul moteur de l'évolution, comme la théorie synthétique de l'évolution le postulait. Aujourd'hui, l'évolution est plutôt vue comme un processus multifactoriel ayant pour matière première l'étonnante plasticité du matériel génétique.

COMMENT CLASSER LE VIVANT ?

Pourtant, la théorie synthétique de l'évolution que Dobzhansky a contribué à élaborer avait déjà effectué une sérieuse avancée en accordant la théorie de l'évolution de Charles Darwin avec la génétique naissante. Darwin avait été le premier à répondre clairement, en 1859, dans *De l'origine des espèces*, aux deux questions fondamentales que se posaient les premiers transformistes tels que les philosophes Pierre Moreau de Maupertuis et Denis Diderot au XVIII^e siècle, puis le naturaliste Jean-Baptiste Lamarck à l'aube du XIX^e: quelle logique doit-on suivre pour établir une véritable classification naturelle des organismes vivants? Quels processus sont à la source de la transformation des organismes vivants? À la première, Darwin avait répondu par le principe de descendance avec modification: *descendance* des caractères héréditaires, qui sont transmis de génération en génération, et *modification* de ces caractères, qui peuvent acquérir un nouvel état, lui aussi héréditaire. Ce principe a pour corollaire l'existence d'une «généalogie» des espèces: la classification naturelle doit être le reflet de cette histoire, de ces apparentements que l'on fait émerger en décelant des caractères homologues, c'est-à-dire hérités d'un ancêtre commun.

LA PART ALÉATOIRE

On a longtemps cru que seule la sélection naturelle entraînait la fixation d'un allèle – un variant d'un gène – dans une population. La découverte de mutations neutres, sans effet particulier, mais elles aussi fixées, a remis en lumière la dérive génétique, proposée dès 1931, mais oubliée ensuite: par hasard, un allèle peut persister et s'installer dans une population. Un allèle neutre a besoin d'un nombre de générations égal à quatre fois l'effectif efficace (le nombre d'individus en âge de se reproduire) pour se fixer. En conséquence, plus la population est petite, plus il se fixe vite (voir la simulation ci-dessous). C'est ce qui se passe lors d'un effet fondateur, c'est-à-dire l'individualisation d'une petite population, par exemple après migration ou lors d'un goulot d'étranglement, quand une population se réduit considérablement après une épidémie.



Conjointement avec le naturaliste britannique Alfred Wallace, Darwin avait aussi proposé la sélection naturelle comme processus majeur de l'évolution: dans une même espèce, certains individus ont une plus grande descendance que d'autres, et donc leurs caractères sont plus (ou moins) représentés à la génération suivante, suivant les conditions de vie. En quelque sorte, l'environnement opère un tri parmi la diversité d'une même espèce. Darwin insistait sur le fait que la sélection naturelle n'était certainement pas le seul mécanisme de l'évolution. Toutefois, à une époque où la biologie était encore balbutiante, il ne pouvait guère aller plus loin. L'avancée déterminante a été réalisée lorsque les concepts majeurs de la génétique de la première moitié du XX^e siècle ont rejoint les déjà riches descriptions de la zoologie, de la botanique et de la paléontologie.

La génétique a pris son essor à l'aube du ^{xx}e siècle avec la redécouverte des lois de l'hérédité du moine morave Gregor Mendel, en 1900, à laquelle s'était ajoutée la théorie des mutations, que le botaniste hollandais Hugo De Vries avait présentée à la même époque. Cette théorie donnait corps au principe de modification de Darwin: selon elle, cette modification était portée par des mutations – des variations qui se produisent par hasard, pour des raisons inconnues, et qui permettent l'évolution. Quelques années plus tard, l'embryologiste américain Thomas Morgan, un des fondateurs de la génétique, développa la théorie chromosomique de l'hérédité: il montra chez la drosophile que les gènes – les facteurs héréditaires – sont disposés le long des chromosomes et peuvent présenter différents états, ou allèles, qui expliquent la diversité héréditaire décrite par Darwin. À partir des années 1920 apparut aussi la génétique des populations, qui visait à appliquer les lois de la génétique mendélienne à l'échelle des populations. Mathématisée par les Britanniques Ronald Fisher et John Haldane, et l'Américain Sewall Wright, elle fournissait un moyen de modéliser l'évolution spatiotemporelle des fréquences des gènes au sein des populations d'organismes vivants, y compris sous l'action de la sélection naturelle.

JOINDRE LA GÉNÉTIQUE À LA THÉORIE DE L'ÉVOLUTION

C'est ainsi qu'entre les années 1935 et 1950, on assista, entre les idées darwiniennes et ces résultats majeurs, à une synergie qui semblait expliquer les observations des zoologistes, botanistes et paléontologues férus d'évolution. Et c'est à cette même époque que Dobzhansky, l'anatomiste Julian Huxley, l'ornithologue Ernst Mayr, le paléontologue George Simpson, le botaniste George Stebbins et d'autres ont formulé la théorie synthétique de l'évolution.

Elle reposait sur deux données essentielles. D'une part, l'adaptation des organismes est la conséquence du tri de la variation génétique par la sélection naturelle, et cette dernière est la cause principale de l'augmentation de la valeur sélective des organismes – de leur aptitude à survivre et à se reproduire. D'autre part, les changements héréditaires – ou mutations – ne sont pas dirigés de manière adaptative: ils ne visent pas *a priori* à faciliter la survie. Néanmoins, en affectant les mécanismes à la base de la biochimie, de la physiologie et du développement des organismes vivants, ils sont à la source de la variation de leurs caractères. En d'autres termes, de tels changements n'apparaissent pas pour résoudre un problème ou favoriser des organismes, mais surviennent indépendamment d'un environnement qui, *a posteriori*, va les sélectionner positivement ou négativement.

Suivant la génétique des populations, le processus de base de l'évolution biologique

était à chercher non au niveau de l'individu, mais à celui de la population, car il y occasionnait, de génération en génération, un changement des fréquences des variations héréditaires, c'est-à-dire un changement dans les proportions des différents variants d'un même facteur héréditaire au sein de la population. Malgré la diversité de leurs disciplines d'origine, les fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution adossaient leur pensée autour de ce processus. Les généticiens comme Dobzhansky y voyaient un changement des fréquences d'allèles (ou variants) d'un ou de plusieurs gènes. Les zoologistes comme Mayr ou paléontologues comme Simpson, qui se penchaient surtout sur les organismes (des phénotypes pour le généticien), considéraient explicitement que les variations des caractères qu'ils observaient dans une population étaient sous-tendues par des changements de fréquences alléliques survenus dans les générations précédentes. C'est pourquoi ils ➤



Rien n'a de sens en biologie si ce n'est à la lumière de l'évolution

Theodosius Dobzhansky (1900-1975), généticien

ont pu résumer la théorie synthétique de l'évolution suivant quelques propositions qui ont structuré un nouveau cadre conceptuel.

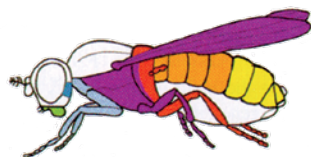
La première proposition définissait le gène, porté par le chromosome, comme base de l'hérédité. Rappelons que les généticiens ont manié le concept de gène pendant un demi-siècle sans en connaître la nature. Celle-ci n'a été révélée qu'en 1953, grâce à la description de la structure de l'ADN. La deuxième proposition concernait les variations héréditaires: elles sont le résultat de mutations individuelles. Elles surviennent aléatoirement parce qu'elles ne résultent pas d'un besoin, d'un avantage pour l'adaptation, c'est-à-dire pour l'intégration de l'organisme dans son environnement. Ainsi, c'est « par hasard » qu'une mutation entraîne un changement phénotypique bénéfique ou délétère, donnant secondairement prise à la sélection.

Une autre proposition précisait les modalités des changements de fréquences alléliques. Les fréquences des variants héréditaires dépendent de trois facteurs: le taux des mutations, les flux de gènes entre populations et la sélection naturelle. Par sélection naturelle, on entend l'ensemble des paramètres qui influent sur la taille de la descendance des organismes, une sélection positive entraînant une nombreuse descendance. Comme c'est la seule cause directionnelle d'un changement adaptatif, les évolutionnistes de l'époque la voyaient comme source de progrès, sous-entendant que le nouvel état est « mieux » que l'ancien. Remarquons que la dérive génétique, une modification aléatoire des fréquences alléliques (voir l'encadré page 48), bien que postulée dès 1931 par Sewall Wright, avait été laissée de côté par les fondateurs de la théorie synthétique.

Une proposition, enfin, définissait les espèces: les espèces d'organismes sexués sont des groupes de populations isolés de leurs congénères d'un point de vue reproductif, en général géographiquement. Elles évoluent alors graduellement et les changements phénotypiques que l'on peut observer entre espèces apparentées correspondent à la somme de changements produits au cours des temps géologiques.

Les zoologistes, botanistes et paléontologues se sont saisis de ce cadre théorique pour proposer une marche graduelle du vivant, progressant de grade en grade vers une meilleure adaptation, suivant une vision ô combien anthropomorphique. Par exemple, la séquence des grades poisson > batracien > reptile > mammifère était vue comme une amélioration continue de la conquête du milieu terrestre. Différents concepts sur la logique de la classification et les mécanismes de l'évolution sont ensuite venus corriger, affiner et compléter cette première et louable tentative de synthèse.

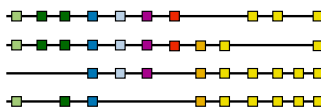
Sous l'impulsion de l'entomologiste allemand Willi Hennig, dont les idées se sont



Gènes de la mouche



Gènes humains



LES GÈNES HOMÉOTIQUES

Ces gènes du développement (au centre, en couleur, situés sur un chromosome chez la mouche, et sur quatre chez l'humain) forment des complexes que l'on retrouve chez la plupart des animaux. Ils s'expriment de façon similaire dans toutes les espèces, le long de l'axe du corps, et dans le même ordre que celui de leur position sur le chromosome.

propagées dans les années 1960, la cladistique – la science des classifications du vivant – a exploité de manière rigoureuse le principe de descendance avec modification, menant à des phylogénies (du grec *phulon* – lignée – et *genesis* – genèse –, c'est-à-dire des arbres racontant la genèse de lignées) fondées exclusivement sur la recherche de parenté. On a rassemblé les espèces en une imbrication de groupes monophylétiques, c'est-à-dire d'arbres comportant un ancêtre commun et l'ensemble de ses descendants.

UNE NOUVELLE CLADISTIQUE

Lors de la construction de la phylogénie, on ne tient désormais compte que de l'état dérivé, récent, d'un caractère, et on laisse de côté l'état ancestral dont il est dérivé. Par exemple, si l'on étudie les primates, on constate que certains ont deux os frontaux, d'autres n'en ont qu'un seul. Or nombre d'autres mammifères ont aussi deux os frontaux, ce qui suggère que ce caractère est hérité d'un ancêtre commun aux primates et à nombre d'autres mammifères. Il s'agit donc d'un caractère primitif partagé – d'un état ancestral du caractère « os frontal ». Et les primates qui n'ont qu'un seul os frontal présentent un état dérivé: la fusion des deux os en un seul. Cette innovation qui leur est propre permet de rassembler tous ces primates en un groupe monophylétique, les simiiformes.

La cladistique a ainsi révélé des parentés cachées. Par exemple, les crocodiles et les oiseaux partagent des caractères exclusifs – des innovations que n'ont pas les squamates (lézards, varans, iguanes, serpents...). Ainsi, la cladistique rapproche les crocodiles et les oiseaux au sein des archosaures, alors qu'auparavant, les crocodiles étaient classés dans les reptiles avec les squamates à cause notamment de leur ressemblance morphologique générale, qui n'est autre qu'un caractère ancestral. Démontant la classification par grades (l'oiseau n'est pas un reptile qui a franchi un saut adaptatif en se mettant à voler, et ne constitue donc pas une classe à part), la cladistique a par ailleurs montré que la notion de progrès est obsolète, chaque espèce étant aussi évoluée qu'une autre. En effet, à un moment donné, elles sont toutes les résultats d'un même temps évolutif. Les hiérarchiser relève donc d'une opération subjective hors du cadre scientifique.

Si la cladistique a été d'une grande utilité pour critiquer les classifications générales incluant les fossiles, à partir des années 1990, elle a très vite été supplantée par les phylogénies moléculaires pour les organismes actuels. De fait, l'essor fulgurant de la biologie moléculaire a été à la source de nombreuses avancées en biologie évolutive. Tout d'abord, elle a apporté nombre de nouveaux caractères à comparer: des mutations sur des gènes, partagées ou non par les organismes comparés, ce qui

permet de déterminer leurs liens de parenté et conduit à des phylogénies de plus en plus fiables. Aujourd'hui, les séquençages d'ADN étant de plus en plus rapides et de moins en moins onéreux, ce sont même les génomes entiers qui sont utilisés en phylogénomique. Mais la cladistique n'est pas oubliée: si les caractères morphoanatomiques ne sont plus utilisés pour construire les phylogénies, la logique permet de suivre l'évolution de ces caractères sur des phylogénies moléculaires. Et en particulier de démasquer des apparitions multiples d'un même événement (convergence). On a ainsi compris que la sociabilité s'est réalisée plusieurs fois indépendamment chez les abeilles. De même, la logique de la cladistique a prouvé que, chez les animaux, l'œil s'est construit de manière convergente, bien qu'empruntant à chaque fois les mêmes gènes de développement. Par le même type de raisonnement, une équipe de l'université de Bergen, en Norvège, vient par ailleurs de mettre fortement en doute l'homologie des chaînes nerveuses des animaux à symétrie bilatérale (bilatériens). L'expression des gènes de développement qui spécifient la polarité dorso-ventrale semble montrer que l'organisation d'une chaîne nerveuse serait apparue

indépendamment chez les vertébrés, les annélides et les arthropodes. Tout cela demande vérification, mais une telle hypothèse avérée remettrait en cause la manière dont les zoologistes voient actuellement l'évolution animale.

Le séquençage des génomes a par ailleurs amené une connaissance approfondie de la mutation, révélant un monde d'une extraordinaire mobilité. La variation héréditaire n'est plus seulement la mutation ponctuelle d'un constituant unique de l'ADN – un nucléotide – comme on l'imaginait auparavant, mais peut correspondre à des accidents du génome de plus ou moins grande taille: duplications de parties de gènes, de gènes entiers, de chromosomes entiers, voire de génomes entiers (polyploidie); déplacement de portions de gènes, de segments chromosomiques...

UN GÉNOME TRÈS MOBILE

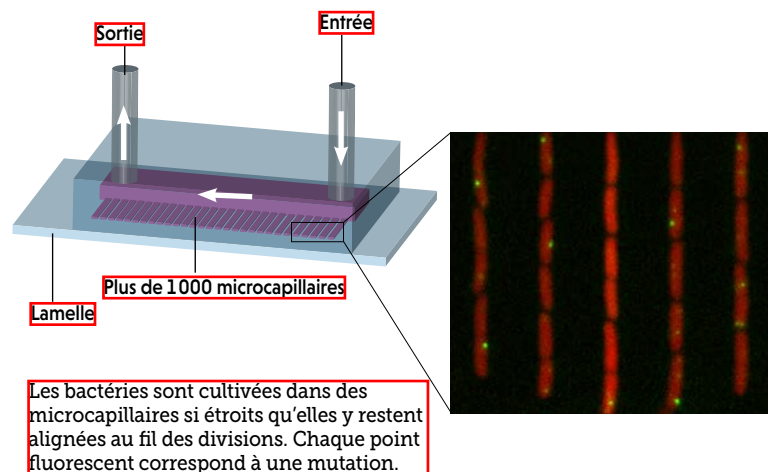
De plus, des éléments génétiques mobiles autonomes, nommés transposons ou éléments transposables, dont la généticienne américaine Barbara McClintock a démontré l'existence dès 1950, peuvent changer de place ou se dupliquer dans le génome. Ils entraînent alors des mutations s'ils s'insèrent dans des séquences qui codent des protéines ou qui régulent l'expression des gènes, c'est-à-dire leur traduction en protéines, et participent à des recombinaisons fortuites du génome – une réorganisation des gènes le long de la molécule d'ADN. Bref, le génome n'est plus vu comme un ruban d'ADN rigide et structuré, mais comme une entité souple, mouvante, douée de fluidité, suivant le terme consacré. Ainsi, le génome est en dynamique permanente et produit continuellement, et de manière aléatoire, de la nouveauté génétique, fait insoupçonné il y a un demi-siècle.

Cette découverte a eu de plus une conséquence inattendue d'un point de vue conceptuel: le retour en force de la dérive génétique comme moteur de l'évolution, aux côtés de la sélection naturelle. En révélant toutes les modifications possibles du génome, la biologie moléculaire a en effet démontré l'existence des mutations neutres, c'est-à-dire de mutations qui ne donnent pas prise à la sélection naturelle (elles n'ont aucun effet sur la survie de l'individu). De telles mutations ne peuvent donc envahir une population que de manière aléatoire, par dérive génétique. Or le temps nécessaire pour un tel phénomène se compte en générations et est proportionnel au nombre d'individus reproducteurs (voir l'encadré page 48). Ainsi, plus la population est petite, plus la fixation d'une mutation neutre sera rapide. La génomique, de même que de récentes expériences sur *Escherichia coli* (voir l'encadré ci-contre), suggèrent que les mutations sont neutres dans leur très grande majorité, et que la dérive aléatoire serait même le processus majeur

SUIVRE EN DIRECT LES MUTATIONS

En 2018, Marina Elez et Lydia Robert, du laboratoire Jean-Perrin, de Sorbonne Université, et leurs collègues ont construit un système expérimental qui permet de suivre en temps réel la dynamique des mutations de bactéries et leurs effets sur le succès reproducteur, caractérisé par leur vitesse de division.

Des bactéries *Escherichia coli* croissent dans un système microfluidique où il est possible de suivre les générations successives (ci-dessous). Les mutations sont visualisées par marquage fluorescent d'une protéine de réparation de l'ADN dont le gène a été modifié pour qu'elle s'accumule aux points où il y a eu des erreurs de lecture de l'ADN lors de la réplication (la duplication du chromosome bactérien), mais sans le réparer. Sur 200 générations, l'équipe a détecté 3 000 points fluorescents, et donc autant de mutations. Seules 1 % de ces mutations étaient létales. Conclusion : les mutations chez *E. coli* sont neutres dans leur très grande majorité.



de l'évolution, au contraire de ce que postulaient les pères de la théorie synthétique.

Dans cette continuité, les résultats de la phylogénomique, alliés à la connaissance de la fluidité du génome, ont débouché vers une autre découverte majeure: les transferts horizontaux de gènes. Si l'on suit à la lettre la descendance avec modification et les bases de la génétique chromosomique, les gènes passent d'une génération à une autre par les gamètes, ce que l'on appelle le transfert vertical. Dans ce cas, l'histoire des gènes calque l'histoire des organismes qui les portent. Or, traitée de cette manière, la phylogénomique fait émerger de nombreuses incohérences qui n'ont pu être résolues que par la prise en compte d'un processus insoupçonné, le transfert horizontal de gènes (surtout impliqués dans le métabolisme – la transformation des nutriments en composants utilisables par l'organisme), c'est-à-dire le passage de matériel génétique d'un organisme à un autre, en dehors de tout phénomène sexué.

DES TRANSFERTS DE GÈNES

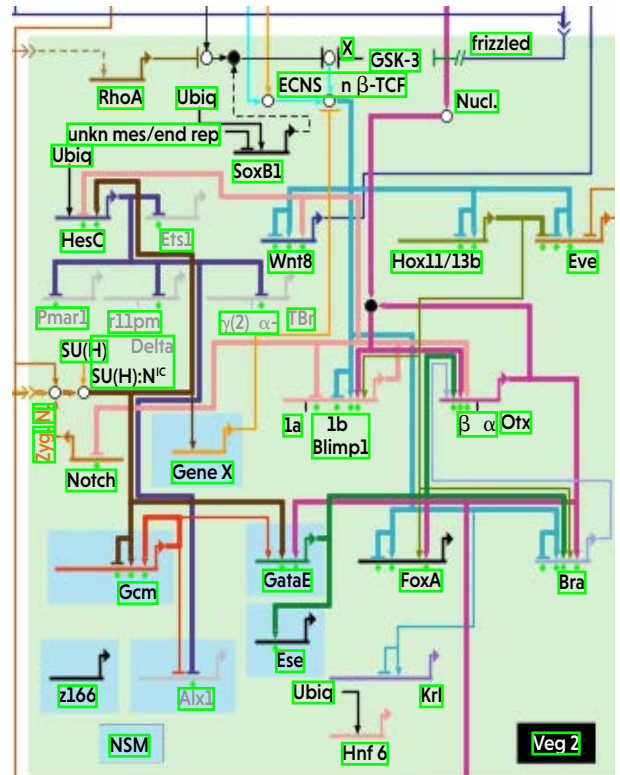
C'est le cas en particulier dans les phylogénies de bactéries et d'archées (les bactéries et les archées constituent deux groupes monophylétiques distincts d'organismes sans noyau cellulaire. Les eucaryotes – organismes à noyau cellulaire –, dont font partie les plantes et les animaux, constituent le troisième grand groupe monophylétique du vivant). Et si de tels transferts horizontaux sont sans doute plus rares chez les macroorganismes, ils peuvent être massifs chez les microorganismes et toucher une large portion du génome: 24% du génome de la bactérie hyperthermophile *Thermotoga maritima*, par exemple, proviennent d'archées.

L'origine évolutive de la cellule eucaryote a alors été complètement revue. On savait depuis longtemps que l'endosymbiose avait joué un rôle clé dans son apparition. La mitochondrie et le chloroplaste, les usines à énergie des cellules eucaryotes, installées dans leur cytoplasme, sont en effet des bactéries symbiotes, mais dont la symbiose avec les cellules eucaryotes est irréversible, car leurs gènes, dans leur majorité, ont rejoint le génome contenu dans le noyau, ce qui fait de ce génome une chimère. Toutefois, les études génomiques ont montré que ce dernier est encore plus chimérique qu'on ne l'imaginait, car les gènes essentiels de la cellule, ceux qui codent les enzymes de duplication, de transcription et de traduction de l'ADN, sont issus d'archées, tandis que la plupart des autres gènes de métabolisme sont d'origine bactérienne. Bref, la cellule eucaryote provient d'une fusion d'au moins une archée et une bactérie, augmentée plus tard des endosymbioses bactériennes.

On ne peut que s'étonner de l'absence de l'embryologie dans la théorie synthétique de l'évolution, d'autant que Darwin l'avait insérée

DES CIRCUITS LOGIQUES ?

La théorie des systèmes pourrait-elle aider à comprendre l'évolution ? C'est ce qu'ont proposé le biologiste américain Eric Davidson, de l'institut de technologie de Californie, à Pasadena, et ses collègues dans les années 2000 en prenant comme exemple l'oursin pourpre de Californie (*Strongylocentrotus purpuratus*). On commençait à bien connaître la cascade d'expression des gènes de développement précoce de l'embryon de cette espèce, dont le génome est séquencé. L'équipe a schématisé le réseau de gènes en action dans les différentes cellules de l'embryon entre 6 et 18 heures après la fécondation. Le schéma ci-dessous représente celui d'une cellule du pôle végétatif qui participe à la spécification de deux feuillettes de cellules de l'embryon, l'endoderme et le mésoderme. Les interactions géniques sont indiquées suivant des circuits élémentaires logiques. Pour Davidson, l'évolution redéploie ces circuits élémentaires, comme un électronicien modifierait l'agencement des modules d'un circuit électronique.



dans *De l'origine des espèces*. Son retour en force dans les années 1980 a pourtant été une autre source clé du renouveau actuel de la théorie de l'évolution. En période prédarwinienne, l'embryologie avait été un élément essentiel du transformisme naissant grâce entre autres aux travaux de Karl von Baer. Dans les années 1820, ce biologiste allemand basé à Saint-Petersbourg avait constaté qu'au tout début de leur développement, les embryons des mammifères, oiseaux et lézards se ressemblaient parfaitement, les originalités des membres respectifs n'apparaissant que plus tard. Il en avait déduit que, lors du développement de l'embryon, les caractères communs à plusieurs groupes d'organismes de l'arbre du vivant apparaissent antérieurement

aux caractères distinctifs de ces groupes. Parallèlement, Johann Meckel avait apporté une autre preuve en faveur de la transformation des espèces, elle aussi issue d'études embryologiques: il avait montré l'étrange devenir du cartilage qui porte maintenant son nom. S'il forme la mandibule inférieure des poissons cartilagineux (les chondrichthyens), il ne sert, chez les tétrapodes, que de point d'ossification pour l'articulaire, un composant de la mâchoire inférieure. Mais les mammifères font exception: chez eux, il donne un osselet de l'oreille interne, le marteau, qui est donc l'homologue de l'articulaire.

Lorsque Darwin avait publié sa théorie de l'évolution, le naturaliste Ernst Haeckel, à Iéna, avait ainsi immédiatement épousé ses concepts et y avait incorporé l'embryologie comparée en formulant sa fameuse théorie de la recapitulation: l'ontogenèse récapitule la phylogenèse, c'est-à-dire qu'on trouve un parallélisme temporel entre l'apparition d'un caractère au cours de l'embryogenèse (ontogenèse) et celle du même organe dans la séquence de ses ancêtres (phylogenèse). Les embryologistes comme l'Anglais Ray Lankester s'étaient alors mis à rechercher les caractères permettant de regrouper les embranchements d'animaux qui avaient des plans d'organisation différents: le nombre de feuillettes de cellules dans l'embryon (les animaux qui n'en ont que deux, comme les méduses et les éponges, sont appelés diblastiques, tandis

Allemands Theodor Boveri, Wilhelm Roux, puis Hans Spemann. Les embryologistes s'intéressaient alors aux mécanismes du développement et considéraient que les mutations que les généticiens étudiaient sur la drosophile (couleur des yeux, du corps, taille des ailes, nombre de soies...) ne présentaient aucun intérêt pour eux. Bref, alors que l'embryologie était devenue une composante puissante de la biologie évolutive, la rupture avait été brutale. Certains généticiens comme Richard Goldschmidt avaient bien tenté de concilier les deux disciplines en proposant une théorie dite «saltatoire». Pour cet Allemand exilé aux États-Unis, des mutations affectant des gènes s'exprimant lors de l'embryogenèse étaient susceptibles de donner, en une seule étape, des individus très différents et éventuellement mieux adaptés, qu'il avait nommés des «monstres prometteurs». Mais la réconciliation ne s'est amorcée que dans les années 1980.

UN MARIAGE INESPÉRÉ

À cette époque en effet, la biologie moléculaire a fait une entrée fracassante en embryologie avec la découverte exceptionnelle de l'homéoboîte, une séquence de 180 nucléotides qui code l'homéodomaine, une séquence de 60 acides aminés, les constituants des protéines. La protéine dotée de cet homéodomaine interagit préférentiellement avec l'ADN et assure ainsi la fonction de régulateur de transcription. Chez la drosophile, huit gènes comportent une telle homéoboîte. Ils sont responsables de l'identité des segments de l'animal (présence de mâchoires, d'ailes, de pattes sur ces différents segments, voir la figure page 50), suivant l'axe antéropostérieur. Ils se trouvent regroupés en deux complexes qui sont le résultat de la scission récente (à l'échelle de l'évolution) d'un unique complexe. Les études moléculaires ont montré que ces gènes, dits homéotiques, sont des paralogues, c'est-à-dire qu'ils sont issus de duplications d'un gène ancestral.

Les embryologistes ont ainsi pu chercher l'homéoboîte chez d'autres animaux, en particulier les vertébrés. Ils ont d'abord décrit les quatre complexes homéotiques de la souris, puis ont découvert que, chez tous les animaux bilatéraux, au moins un complexe homéotique est responsable de la signalisation le long de l'axe antéropostérieur, c'est-à-dire du déclenchement des cascades moléculaires qui établissent l'identité des segments suivant cet axe durant le développement embryonnaire. Ce résultat a ensuite été élargi à l'axe dorsoventral avec la découverte d'autres gènes de développement, si bien que l'on en a conclu que presque tous les animaux utilisent les mêmes gènes et les mêmes voies de signalisation pour gérer les identités segmentaires le long des axes antéropostérieur et

24% du génome de la bactérie *Thermotoga maritima* proviennent d'archées

que les autres, à trois feuillettes, sont les triblastiques), la provenance de la bouche, qui dérive du blastopore, le premier orifice de l'embryon, chez les protostomiens comme les insectes ou les mollusques, ou qui est une néoformation chez les deutérostomiens comme les vertébrés, et bien d'autres encore. Au début du xx^e siècle, les généticiens avaient d'ailleurs souvent débuté par l'embryologie, comme Thomas Morgan ou le Britannique William Bateson, l'inventeur, en 1906, du terme «génétique».

Pourtant, au cours des années 1920, le divorce avait eu lieu. L'embryologie expérimentale s'était développée sous l'impulsion des

V dorsoventral. Un résultat majeur au regard de l'évolution, puisqu'il fournissait une nouvelle piste pour comprendre l'histoire évolutive des bilatériens, et peut-être même la possibilité de déterminer les gènes de développement, dont le complexe homéotique, que possédait l'ancêtre des bilatériens, vivant il y a 520 millions d'années d'après les paléontologues.

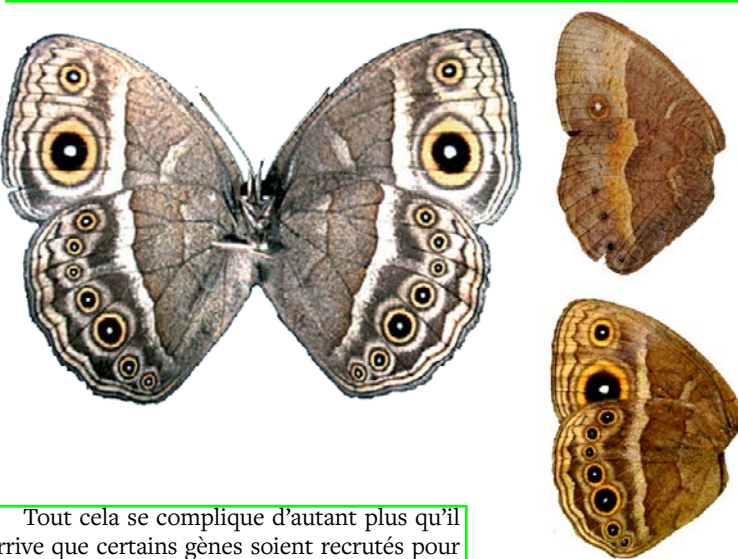
Cette fois, les travaux de génétique et de génomique répondaient aux vœux des embryologistes. Une nouvelle discipline fut créée, la biologie évolutive du développement, ou évo-dévo. Mais, comme toujours en science, ces découvertes posaient plus de questions qu'elles n'apportaient de réponses. Comment des animaux ayant globalement la même boîte à outils moléculaires pouvaient-ils présenter des plans d'organisation aussi différents? Une seule solution possible: ce n'était pas tant la structure des gènes qui comptait que leurs modes d'expression. Cette idée présentait un puissant intérêt: la connaissance précise de tels mécanismes permettrait de s'attaquer à un des problèmes majeurs de la biologie évolutive, la source de la variation naturelle.

UN LEGO GÉANT

Dans les années 1990, les biologistes ont ainsi décodé les cascades de régulation des premiers stades du développement (par exemple, la détermination du mésoderme, le troisième feuillet des triblastiques) ou de la formation d'organes particuliers bien localisés (œil, pan-créas...). Ces réseaux de régulation génétique fournissent des explications en termes de théorie des systèmes, car ils constituent, à des degrés hiérarchiques différents, une combinaison de circuits que l'on peut traiter comme des modules élémentaires recevant des informations internes et externes à la cellule. À l'institut de technologie de Californie, à Pasadena, Eric Davidson a été pionnier dans la modélisation de ces réseaux de régulation génétique, dont il a listé les structures logiques des principaux circuits élémentaires en prenant pour objet le développement de l'oursin (*voir l'encadré page 52*). Il considère l'évolution comme un réassemblément, un redéploiement de ces circuits élémentaires. Ce processus modulaire doit être testé en comparant le développement d'animaux dont on connaît les relations phylogénétiques. Vraisemblablement, certains réseaux de régulation génétique sont spécifiques de lignées – Eric Davidson les nomme réseaux-noyaux. L'intérêt considérable de cette approche est l'utilisation des lois de la théorie des systèmes sur ces réseaux. On montre alors que toutes les combinaisons de tels circuits élémentaires ne sont pas possibles, et donc que toutes les variations ne sont pas envisageables. Il y a des contraintes et l'évolution du développement se trouve en quelque sorte canalisée.

DES GÈNES DÉTOURNÉS

Il arrive que des gènes acquièrent, à côté de leur fonction principale, commune à de nombreux organismes, une nouvelle fonction chez certaines espèces. C'est le cas des gènes *Notch*, *engrailed* et *distal-less* chez *Bicyclus anynana*, un papillon d'Afrique de l'Est (ci-dessous). Ces trois gènes sont présents chez tous les grands phylums d'animaux bilatériens. Ce sont des gènes de la mise en place de l'organisation du corps de l'animal. Le gène *Notch* code un récepteur membranaire, premier élément de la voie de signalisation Notch, une cascade d'activation de gènes qui intervient dans la communication entre cellules et est impliquée dans le contrôle de la différenciation cellulaire. Le gène *engrailed* code une protéine à homéodomaine qui, chez la drosophile, détermine la polarité des segments. Le gène *distal-less* est d'abord connu pour s'exprimer lors du développement des pattes des insectes. Mais chez le papillon *B. anynana*, outre leurs fonctions dans le développement, ces trois gènes spécifient la taille des ocelles des ailes. De plus, les expressions temporelles de ces gènes varient en fonction de la température du développement larvaire. À 17 °C, les ocelles sont petits (à droite, en haut), tandis qu'à 27 °C, ils sont grands (en bas), ce qui mime les phénotypes différents observés entre saison sèche et saison humide.



Tout cela se complique d'autant plus qu'il arrive que certains gènes soient recrutés pour d'autres fonctions (*voir l'encadré ci-dessus*) et qu'une même enzyme remplisse plusieurs fonctions dans une cellule, ce que les Anglo-Saxons nomment le «travail au noir» des protéines. Ainsi, l'organisme apparaît comme un gigantesque Lego étant donné que tout est modulaire: brassage de fragments de gènes, duplications de gènes, de chromosomes et de génomes, combinaisons de circuits élémentaires... De plus, l'organisme ne doit plus être considéré de manière isolée, mais avec tous ses symbiotes (le microbiote du tube digestif des animaux, les mycorhizes des végétaux...), formant ce qu'on appelle le phénotype étendu, celui qui est véritablement sous le joug de la sélection naturelle. Tel est le visage composite du vivant que nous offre la biologie évolutive aujourd'hui, et la nouvelle idylle entre développement et évolution est certainement l'événement majeur de ces dernières décennies dans le domaine, d'autant que nous n'en sommes qu'à ses débuts.

Mais l'embryologie n'est pas la seule discipline à s'être récemment rapprochée de la biologie évolutive. Un autre domaine plus récent, l'épigénétique, mais aussi l'éthologie et



l'écologie, apportent à leur tour leur lot de surprises. L'épigénétique a en effet récemment offert une réponse séduisante à une question soulevée ces dernières années. Dès la fin des années 1990, les phylogénies moléculaires avaient montré que les séquences d'ADN n'évoluent pas à vitesse constante et que cette vitesse varie selon les espèces et selon les gènes. Bref, tout varie en même temps, avec des périodes d'accélération des mutations suivies de périodes de stases de moindres changements évolutifs. Pourquoi observait-on de telles variations? Rien ne permettait de l'expliquer.

Certes, au début des années 1970, Niels Eldredge et Stephen Jay Gould avaient proposé une hypothèse de travail intéressante de ce point de vue – le concept d'équilibres ponctués. À l'époque, les deux paléontologues américains cherchaient à intégrer dans une même théorie la dérive génétique et les idées de Richard Goldschmidt sur les changements brutaux de forme, ces «monstres prometteurs» susceptibles d'apparaître à la suite d'une mutation d'un gène du développement. Suivant leur hypothèse, une nouvelle espèce se forme lorsqu'une population à faible effectif se retrouve isolée. Par dérive génétique, elle évolue alors rapidement du fait de sa petite taille: c'est la ponctuation. En cas de réussite, son effectif augmente, ce qui diminue l'impact de la dérive génétique et ralentit donc la vitesse d'évolution de la population: c'est la stase. Ainsi, dans un même groupe phylogénétique, on aurait, suivant les temps géologiques, des successions de périodes de stabilité et de périodes d'évolution rapide. Le concept d'équilibres ponctués fournissait donc un mécanisme intéressant pour expliquer les variations de vitesse d'évolution observées. Toutefois, faute de preuves, il restait hypothétique.

Or ces dernières décennies ont vu l'émergence de l'épigénétique, l'étude de l'ensemble des changements dans l'expression des gènes qui sont transmissibles au fil des divisions cellulaires, voire des générations, et qui ne modifient pas la séquence d'ADN. Cette discipline a révélé un système complexe de régulation surimposé au génome, impliquant des marqueurs héréditaires comme des méthylations de l'ADN (ajout d'un groupement méthyle CH_3 sur un nucléotide), des modifications des histones, les protéines autour desquelles l'ADN s'enroule, mais aussi des ARN non codants – des produits de la lecture de l'ADN qui ne codent pas de protéines et qui, en interférant de façon spécifique avec d'autres ARN intermédiaires de traduction des protéines, influent sur le lieu et le moment de l'expression de gènes. Pas à pas, différents résultats expérimentaux ont mis en relief ces actions. Citons par exemple la preuve, à la fin des années 1980, de l'inactivation par méthylation, dans des plantes, de transgènes – des gènes transférés dans le génome de plantes à l'aide de la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*. Or une telle régulation épigénétique réprime en général la mobilisation des transposons, qui restent figés à leurs places dans le génome (voir l'article page 58).

Une hypothèse évolutive a alors été avancée: si, en temps normal, la régulation épigénétique empêche l'expression de gènes étrangers, on peut imaginer que lors d'une dérégulation, les transposons se mobilisent largement, amenant une restructuration du génome accompagnée de mutations à la source d'innovations génétiques. Naturellement, cette hypothèse s'appuyait sur des résultats expérimentaux, dont l'un des plus démonstratifs a été obtenu en 1998 par une équipe de généticiens français autour de Véronique Ladevèze, de l'université de Poitiers.

Certaines orques se nourrissent de phoques, d'autres de poissons en les chassant en groupe. Toutefois, les techniques sont si différentes que celles qui ont appris à chasser le phoque ne savent pas chasser le poisson et vice versa. Les deux populations ne se mêlent donc pas, ce qui introduit un biais de sélection.

➤ Après avoir transformé des lignées de drosophiles en injectant à des embryons un transposon nommé *hobo* dont elles étaient dépourvues, l'équipe a suivi les lignées pendant 100 générations. Dans l'une d'elles, les chercheurs ont détecté à cinq reprises des inversions de portions de chromosomes, avec des éléments *hobo* situés aux points de cassure. Cette découverte est essentielle, car l'une des objections les plus importantes à la théorie des équilibres ponctués touchait à l'apparition de la nouveauté au cours de la ponctuation. Certes, la dérive génétique change drastiquement les fréquences alléliques, mais elle ne peut tout expliquer. Ici, l'épigénétique fournit une explication fascinante.

Lorsqu'une population à faible effectif s'isole, elle occupe un nouveau territoire avec de nouvelles conditions de milieu susceptibles d'entraîner des stress physiologiques. De son côté, la dérive génétique peut aussi avoir comme effet des perturbations du génome et contribuer au stress. Or nombre d'études, au départ surtout sur des végétaux, ont montré en laboratoire que la régulation épigénétique est modifiée par des stress physiologiques résultant de perturbations environnementales : radiations, attaques virales, pollution de l'air, variations brutales de température, changements de régime nutritionnel pour les animaux. En d'autres termes, un tel isolement pourrait entraîner une importante mobilisation de transposons. Dans la plupart des cas, tous ces bouleversements génomiques seraient létaux. Mais dans de rares cas, le succès serait présent, accompagné d'innovations génétiques apparues très rapidement. Naturellement, la régulation épigénétique s'installerait de nouveau, à la source d'une nouvelle stase.

Cet exemple montre à quel point l'épigénétique est d'importance en évolution : des successions de régulations et de dérégulations expliqueraient au niveau moléculaire les successions de stases et de ponctuations mises en évidence tant en phylogénomique qu'en paléontologie. Certaines régulations épigénétiques pourraient donc être transmises de façon héréditaire sur plusieurs générations au cours de ces stases.

LE RÔLE DE L'HÉRITAGE CULTUREL

L'éthologie a quant à elle révélé l'influence de la culture dans la sélection naturelle. La connaissance de plus en plus précise du comportement de primates et d'oiseaux a révélé que l'espèce humaine n'est pas la seule à posséder des cultures. Or il est clair que la culture apparaît comme un facteur évolutif : elle change les paramètres de la sélection naturelle et peut être à la source d'un isolement reproducteur.

L'exemple le plus spectaculaire est sans doute celui des orques ou épaulards (*Orcinus orca*). Ces cétacés vivent (sauf exception) en groupes, qui se nourrissent soit de poissons,



soit de phoques. Or les techniques de chasse, qui impliquent la participation de l'ensemble du groupe, sont bien différentes et, surtout, apprises. Un adulte qui a appris à chasser les poissons ne sait pas chasser les phoques et *vice versa*. Cela signifie qu'une orque vivant dans un groupe ichtyophage ne peut rejoindre un groupe chasseur de phoques. Cela entraîne ainsi un isolement reproducteur, ce que démontre la génétique des populations. La culture n'agit donc que comme composante de la sélection naturelle. Doit-on en tenir compte ? Certes ! Doit-on la considérer comme une force essentielle de l'évolution ? Sans doute pas.

La construction de niche est un autre concept émergeant issu cette fois de l'écologie, candidat à être une des composantes majeures de l'évolution. En fait, la construction de niche met l'accent sur l'importance évolutive des modifications de l'environnement réalisées par les organismes vivants. En effet, certains organismes modifient leur milieu et agissent ainsi sur sa valeur sélective. Le castor du Canada (*Castor canadensis*), notamment, est un animal ingénieur qui perturbe le régime hydraulique naturel de zones humides (tourbières, petits cours d'eau), ce qui change les pressions de sélection (température, humidité, courants, parasites...) qu'il subit. Il existe donc une rétroaction de l'animal sur son environnement, laquelle peut être transmise à la génération suivante et devenir ainsi un

Le castor du Canada fait partie de ces animaux ingénieurs qui modifient considérablement leur environnement. En construisant des barrages sur les cours d'eau, ils créent de vastes zones humides en amont. En retour, ce nouvel écosystème influe sur leur évolution.



même veine, on peut leur associer les animaux ingénieurs (les castors, mais aussi les éléphants qui aèrent les forêts, les hippopotames qui labourent les estuaires...) ou ceux clés de voûte comme les loutres marines, qui, en chassant les oursins, favorisent le développement du kelp, une algue dont ces derniers se nourrissent. Bref, ici encore, des éléments classiques jouent exclusivement sur certains paramètres de la sélection naturelle. Attention cependant, ne nous y trompons pas : comme la culture, la construction de niche est héritable, mais pas héréditaire. Si toutes deux jouent un rôle dans l'évolution biologique, c'est en orientant la sélection naturelle. On parle alors d'héritage «inclusif» ou «non génétique».

VERS DES BOUCLES ÉTRANGES ?

Sommes-nous réellement bien loin de la théorie synthétique de l'évolution ? D'un côté, on pourrait dire que nous l'avons plutôt précisée. La classification phylogénétique a été revue, de même que la place prépondérante de la sélection naturelle comme moteur de l'évolution et son corollaire, l'idée de progrès au fil de l'évolution. La dérive génétique et le neutralisme sont désormais devenus incontournables. Différents approfondissements ont par ailleurs eu lieu. On connaît maintenant les subtilités moléculaires de la mutation et de la fluidité du génome. On saisit l'importance des symbioses – et plus généralement des interactions durables – qui redessinent l'entité soumise à la sélection. Les composantes de la sélection naturelle sont de plus en plus élucidées, mêmes celles relevant de la culture ou de la construction de niche.

Mais d'un autre côté, la prise en compte des transferts horizontaux, de l'évo-dévo et de l'épigénétique est une réelle nouveauté, ceux-ci apparaissant comme les sources majeures d'explications sur la variation et l'innovation biologique. Qui plus est, ces apports laissent place à la modélisation. Les réseaux de régulation génétique peuvent être traités suivant une logique booléenne. Par ailleurs, les théoriciens qui utilisent la mathématique des réseaux pour suivre les transferts de gènes (voir la figure page 47) se rendent compte que cet outil peut être utilisé pour relier de manière plus vaste les données obtenues à trois niveaux d'organisation différents – génomique, organique et écologique –, qui sont justement les trois niveaux de la biodiversité. Une telle intégration répondrait aux rêves des fondateurs de la théorie des systèmes qui, dans les années 1950, n'avaient pas assez de données expérimentales à disposition. On donnerait ainsi peut-être corps à des boucles de régulation unissant différents niveaux d'organisation – les fameuses «boucles étranges» postulées par le philosophe américain Douglas Hofstadter. ■

héritage écologique. L'idée clé est que les propriétés évoluées d'un organisme (comportement, métabolisme...) transforment certains aspects de son environnement, lesquels agiront à leur tour comme nouveaux paramètres de la sélection naturelle, orientant ainsi la future évolution des populations.

Le meilleur exemple est peut-être le remplacement, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, de l'atmosphère primaire terrestre réductrice, sans dioxygène, par une atmosphère oxydante grâce à l'expansion des organismes photosynthétiques, dont les dégagements de dioxygène ont été suffisants pour que celui-ci s'accumule dans l'atmosphère : le métabolisme de certains organismes vivants transforme un milieu, ce qui change certains paramètres biophysiques de la sélection naturelle. Un parallèle fort avec la culture apparaît ici : l'héritage écologique est héritable et n'agit que comme composante de la sélection naturelle. Doit-on en tenir compte ? Évidemment. D'ailleurs, Darwin fut le premier évolutionniste à le faire. N'oublions pas que son dernier ouvrage, publié en 1881, soit un an avant sa mort, était intitulé : «Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale avec des observations sur leurs habitudes». Darwin y montre non seulement que les vers de terre ont la capacité de tirer profit de leurs expériences, mais qu'ils ont une influence géologique majeure sur les changements du paysage. Dans cette

BIBLIOGRAPHIE

Vingt contributions dans le numéro : « New trends in evolutionary biology : biological, philosophical and social science perspective », Interface Focus, vol. 7(5), 2017.

E. Davidson, Emerging properties of animal gene regulatory networks, Nature, vol. 468, pp. 911-920, 2010.

H. Vaucheret et al., Transgene-induced gene silencing in plants, The Plant Journal, vol. 16(6), pp. 651-659, 1998.

V. Ladeveze et al., Hobo transposons causing chromosomal breakpoints, Proc. R. Soc. Lond. B, vol 265, pp. 1157-1159, 1998.

EDITH HEARD

est directrice générale du Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), à Heidelberg, en Allemagne, et professeure au Collège de France, titulaire de la chaire Épigénétique et mémoire cellulaire.



VINCENT COLOT

est directeur de recherche au CNRS et dirige le groupe Dynamique des génomes et variation épigénétique à l'École normale supérieure, à Paris.

L'épigénétique est un modulateur clé de l'évolution

En agissant sur la capacité de séquences mobiles d'ADN – des transposons – de se déplacer dans le génome, l'épigénétique garde sous son contrôle un puissant réservoir de variations susceptibles d'avoir un effet majeur au sein d'une même espèce. L'environnement influence-t-il ce contrôle ?

Comment définiriez-vous l'épigénétique aujourd'hui ?

Edith Heard : La définition sur laquelle repose mon travail est celle issue des travaux du Britannique Robin Holliday et de l'Américain Arthur Riggs menés dans les années 1970 : l'épigénétique est l'ensemble des changements d'expression des gènes qui sont transmissibles au cours des divisions cellulaires ou à travers les générations et qui n'impliquent pas de changement de la séquence d'ADN. Mais la définition de Conrad Waddington revient en force depuis une vingtaine d'années. En 1942, ce biologiste britannique a voulu rapprocher deux domaines, la génétique et l'embryologie, afin d'établir un lien entre génotype (le patrimoine héréditaire d'un individu, porté par les gènes) et phénotype (les caractères observables de l'individu). À l'époque, on ne savait pas de quoi étaient faits les gènes. Waddington a proposé de nommer épigénétique l'étude des mécanismes du développement par lesquels les gènes déterminent les caractères. Cette définition a pris un sens plus général aujourd'hui, à mesure que l'on s'est intéressé aux variations plus ou moins grandes de phénotypes que peuvent engendrer pour un même génotype des environnements différents.

Vincent Colot : Oui, la définition de Waddington est prévalente de nos jours : pour faire court, elle englobe tous les processus de régulation de l'expression des gènes, soit dans un cadre développemental, soit en réponse à des signaux de l'environnement externe. On sait que chez les eucaryotes (les organismes dont les cellules ont un noyau), cette régulation fait intervenir de nombreux mécanismes agissant sur la chromatine – la structure compacte que forment l'ADN et les protéines (histones) autour desquelles il est enroulé dans le noyau. Pour ma part, comme Edith, ce sont les mécanismes de contrôle conduisant à une « mémoire » des états d'expression des gènes au travers des divisions cellulaires ou des générations qui m'intéressent, et leurs conséquences. C'est dans ce cadre que j'étudie plus particulièrement, chez les plantes, l'héritage au fil des générations d'une marque de la chromatine, la méthylation de l'ADN – l'ajout d'un groupement méthyle (CH_3) à certains nucléotides le long de la séquence de l'ADN.

Connaît-on beaucoup de mécanismes épigénétiques ?

Vincent Colot : Oui, ils sont très variés, surtout chez les eucaryotes où la régulation de l'expression des gènes est bien plus complexe que chez les bactéries. L'ADN n'est pas juste lu et transcrit par des protéines : il est enroulé autour d'histones qui elles-mêmes sont sujettes à de nombreuses modifications chimiques, et la chromatine interagit aussi avec des ARN (des

produits de lecture de l'ADN) dits non codants, car leur fonction n'est pas d'être traduits en protéines. L'organisation tridimensionnelle de la chromatine dans le noyau joue aussi un rôle important, comme Edith l'a montré à propos du chromosome X.

Edith Heard : En plus des mécanismes liés à la chromatine, il existe de nombreuses autres stratégies que les chercheurs commencent à disséquer. Le cas des criquets pèlerins *Schistocerca gregaria* montre à quel point ces stratégies sont diverses. Un criquet seul vit tranquillement sous les arbres, en solitaire. Mais dès que l'on met plus de trois criquets solitaires à proximité, ils changent complètement de comportement en quelques heures. Ils deviennent agressifs et se rassemblent, marchent en ligne, puis se mettent à migrer et à voler. Ils changent aussi de couleur et de morphologie (voir les figures pages 60 et 61), et leur descendance conserve ces attributs, qui sont même renforcés au fil des générations.

Il y a quelques années, Stephen Simpson, de l'université de Sydney, et ses collègues ont essayé de voir si cette transmission était juste liée à un apprentissage comportemental : les petits auraient-ils acquis les mêmes attributs que leurs parents en apprenant à leur contact à devenir agressifs et à migrer ? En fait, pas du tout : la femelle criquet pond ses œufs fécondés sous le sable, puis ne s'en occupe plus. En revanche, elle dépose avec eux une mousse. Et si la femelle s'est transformée au préalable, la mousse sécrétée suffit à modifier le comportement, la morphologie et le métabolisme des descendants. Une seule molécule induit tous ces changements : une forme de L-dopa, un précurseur de la dopamine, un messager chimique du système nerveux. Cette molécule déclencherait toute une cascade développementale qui aurait un impact sur la physiologie. Pour moi, c'est de l'épigénétique : le comportement grégaire induit chez les individus des changements massifs d'expression des gènes (via la production accrue d'un autre messager neuronal, la sérotonine), et une fois que ce mécanisme est enclenché, il est transmis par la mère d'une génération à l'autre sans que cela soit codé dans les gamètes.

Les modifications épigénétiques peuvent-elles être héréditaires ?

Vincent Colot : Nos recherches et celles d'autres équipes travaillant chez les plantes ont établi sans aucun doute possible qu'il peut y avoir des variations héréditaires de caractères sans le moindre changement de la séquence de l'ADN. Chez la plante *Arabidopsis thaliana*, nous avons produit une population d'individus ayant tous un même génome, mais qui diffèrent les uns des autres par leur profil de méthylation

de l'ADN. Et nous avons observé qu'une partie de ces différences sont transmises fidèlement au travers de dizaines de générations, sans que cette transmission ne repose sur un quelconque changement de la séquence d'ADN.

Et chez les animaux ?

Vincent Colot : Chez le ver *Caenorhabditis elegans*, on commence à avoir des preuves. L'équipe d'Oded Rechavi, à l'université de Tel-Aviv, a notamment montré, ces dernières années, qu'en réponse à différents stress environnementaux, ce ver produit des petits ARN, et que cette production se renforce au fil des générations tant que nécessaire. Un mécanisme de rétroaction détermine par ailleurs si cette réponse épigénétique sera mémorisée ou oubliée à la génération suivante.

Edith Heard : Il y a aussi des cas chez la souris avec le gène *agouti*, qui contrôle la distribution de mélanine dans le pelage, et donc sa couleur. Emma Whitelaw de l'institut de recherche médicale du Queensland en Australie, Robert Waterson, à l'université Duke, aux États-Unis, et leurs collègues ont par exemple montré dans les années 2000 qu'il était possible d'induire un état de méthylation au niveau de ce gène et de le conserver sur plusieurs générations. Dans ce cas, la transmission est métastable : parmi la progéniture, certaines souris ont le gène méthylé, d'autres non. Mais en sélectionnant les souris qui portent l'état recherché, on maintient la lignée. Et en jouant sur le régime alimentaire, on peut aussi favoriser la transmission de cet état.

Vincent Colot : En fait, la transmission stable telle qu'on l'a obtenue avec *Arabidopsis* est un cas extrême. Nos travaux montrent qu'il existe un champ continu des possibles entre une transmission très stable, mendélienne, et des transmissions quasi évanescences.

Justement, dans la nature, où l'on a plutôt de tout, les états épigénétiques sont-ils transmis sur un nombre suffisant de générations pour donner prise à la sélection naturelle ?

Vincent Colot : Dans notre expérience, nous avons observé que deux états épigénétiques alternatifs se transmettent sur au moins une vingtaine de générations et peuvent donc donner prise à la sélection. Nous l'avons d'ailleurs testé : parmi les plants de notre système expérimental, qui ont donc tous quasiment le même génome, mais des profils distincts de méthylation de l'ADN, nous avons sélectionné des phénotypes extrêmes – des racines très longues ou très courtes, par exemple. Nous avons vu que cette sélection était fortement corrélée à la présence d'une signature épigénétique particulière (ADN méthylé *versus* ADN non méthylé) à



quelques endroits précis du génome, en accord avec un lien causal.

Edith Heard : Mais on ne sait pas si ça marche comme ça dans la nature.

Vincent Colot : Oui, mais le variant que nous avons établi au laboratoire existe aussi dans la nature. La grande question est donc maintenant de comprendre comment il y est apparu, avant même de se demander s'il a été sélectionné.

L'épigénétique joue-t-elle un rôle dans les vagues de mutations observées dans la nature ?

Vincent Colot : Cela se pourrait. On vient en effet de trouver une telle situation au laboratoire en libérant un transposon chez *Arabidopsis*. Les transposons sont des séquences d'ADN capables de se déplacer de façon autonome dans le génome : ils comportent des gènes codant des enzymes dont le rôle est de les dupliquer ou de les couper et de les insérer ailleurs. Ces éléments mobiles et leurs vestiges – des transposons qui ont perdu leur mobilité au fil des mutations –, sont très nombreux et répartis dans tout le génome : chez l'humain, ceux identifiés constituent environ 50% de la séquence d'ADN, mais ils occupent en réalité sans doute plus de 80% de notre ADN, même si seul un petit nombre de transposons (les plus récents) sont encore mobiles. Or on s'est aperçu ces dernières années que les transposons et leurs dérivés sont des porteurs privilégiés de marques épigénétiques. Dans nos expériences, notamment, l'épigénétique transmissible à travers les générations est sous-tendue par la présence de transposons ou de leurs vestiges à proximité des gènes. De fait, tout le

Quand le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* est solitaire, il vit tranquillement au sol, sous les arbres, et est plutôt marron-vert (à gauche). Mais si on rapproche plusieurs criquets solitaires, ceux-ci changent en quelques heures de comportement et de morphologie, devenant grégaires et agressifs, et très colorés (à droite). Ces changements sont transmis aux générations suivantes par une molécule que la mère se met à produire dans la mousse destinée à nourrir sa progéniture.



monde s'accorde à dire qu'au moins chez les mammifères et les plantes, les phénomènes épigénétiques expérimentaux qui semblent traverser les générations sont très souvent liés à la présence, à proximité d'un gène donné, d'un transposon intact ou fossile. Il est le plus souvent méthylé – c'est l'état de répression classique –, mais il arrive que la méthylation soit perdue. Peut-être que la fonction première de l'épigénétique en lien avec l'évolution est de contrôler l'activité de ces séquences mobiles et de limiter leur dissémination dans le génome.

A-t-on observé un tel contrôle dans la nature ?

Edith Heard : Il est clair que les transposons attirent la machinerie épigénétique, telles les enzymes qui méthylent l'ADN ou modifient les histones, souvent en lien avec le mécanisme d'interférence à ARN, par lequel les ARN non codants modifient l'expression de gènes. En général, cette machinerie inactive les transposons et, avec le temps, ceux qui n'ont pas été éliminés par la sélection naturelle dégénèrent : ils dérivent de façon neutre et accumulent des mutations. Toutefois, certains gardent leur capacité d'attirer la machinerie épigénétique et peuvent contribuer à l'évolution des réseaux de régulation des gènes.

Vincent Colot : Ces vestiges ou fossiles constituent alors des sortes de modules épigénétiques à la disposition des gènes à proximité. De très beaux travaux de Didier Trono, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et de Cedric Feschotte, de l'université Cornell, aux États-Unis, ont montré que des réseaux de régulation de l'expression des gènes chez les mammifères, dont l'homme, sont en grande

partie constitués de tels vestiges, qui mettent tout un ensemble de gènes sous le même type de contrôle épigénétique.

Edith Heard : On rejoint l'hypothèse qu'avait formulée Barbara McClintock lorsqu'elle a découvert les transposons vers 1950 : c'étaient pour elle des éléments de contrôle de l'expression des gènes, même si elle ne parlait pas d'épigénétique.

Comment ces éléments interviendraient-ils dans les vagues de mutations ?

Edith Heard : Les transposons pourraient jouer un rôle dans l'évolution accélérée. On sait que quand le contrôle épigénétique est altéré, comme lors de stress environnementaux, certains transposons sont remobilisés, ce qui conduit à une période transitoire d'instabilité génomique. Par exemple, un choc thermique rend la chromatine moins compacte, ce qui pourrait déclencher la mobilisation de transposons. À Hawaï, où le volcanisme crée des conditions environnementales plutôt hostiles, les espèces de drosophiles sont extraordinairement nombreuses. Des chercheurs ont émis l'hypothèse que cette diversification extrême serait la conséquence directe de cet environnement, qui aurait conduit à des « explosions » répétées d'activité des transposons. En retour, ces explosions auraient produit la variation génétique nécessaire à l'adaptation aux conditions du milieu et à la spéciation.

A-t-on des preuves d'un tel scénario où un stress environnemental remobiliserait un transposon en dérégulant son contrôle épigénétique ?

Vincent Colot : Il n'existe pas de preuve directe que cela se produit dans la nature. Il faut savoir que la mobilisation des transposons y est extrêmement rare, sauf situations très particulières. En revanche, il est possible de faire bouger au moins certains d'entre eux en laboratoire en modifiant leur contrôle épigénétique. En effet, si on ne sait pas encore vraiment ce qui déclenche la perte de méthylation en conditions naturelles, on peut l'induire en perturbant le fonctionnement des enzymes qui méthylent l'ADN. C'est ce que nous avons fait dans nos souches d'*A. thaliana*, et certains transposons se sont mis à bouger ! Nous avons pu observer qu'une réaction en cascade se produit à partir d'un seul transposon remobilisé. Très vite, en trois ou quatre générations seulement, on arrive à des taux de mutations infernaux : on crée bien plus de mutations par cette mobilisation que de mutations spontanées dues aux erreurs de réplication de l'ADN. En somme, dans notre expérience, la dérégulation épigénétique agit comme un accélérateur de l'évolution.

BIBLIOGRAPHIE

« **Épigénétique, environnement, biodiversité** », cours 2018-2019 d'Edith Heard au Collège de France : bit.ly/2IYZC37

L. Quadrona et al., **Transposon accumulation lines uncover histone H2A.Z-driven integration bias towards environmentally responsive genes**, *Biorxiv*, 2018.

> Que se passe-t-il ensuite ?

Vincent Colot : Le contrôle épigénétique par la méthylation de l'ADN finit par se mettre en marche et inactive d'un coup toutes les nouvelles copies du transposon générées lors de la réaction en cascade. Dès lors, on a pu s'intéresser à l'impact de chacune de ces copies et de leur état épigénétique sur les gènes voisins. Si certaines copies n'avaient aucun effet, d'autres modifiaient l'expression d'un gène à proximité. Or, parmi ces dernières, plusieurs ne le faisaient que lorsqu'elles n'étaient pas méthylées. Dès que la méthylation revenait, elles devenaient inactives et n'avaient plus du tout d'effet.

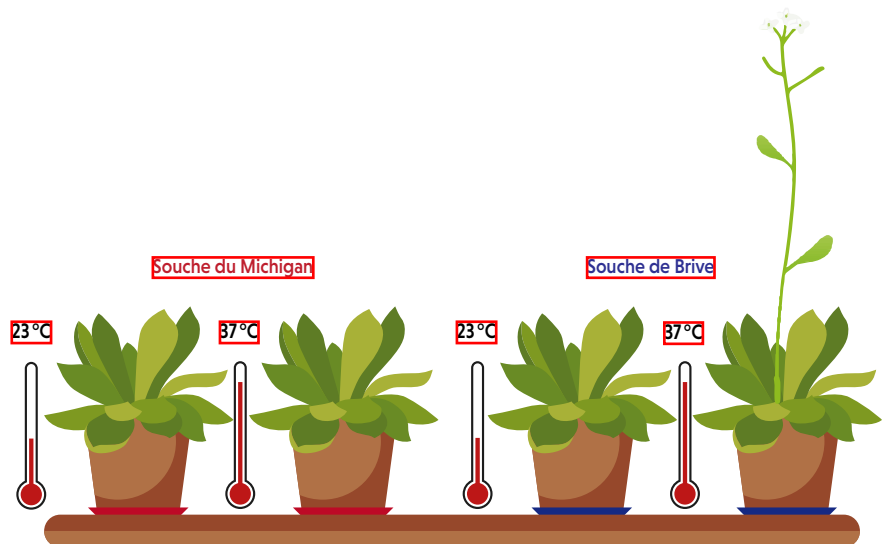
Sans que la séquence d'ADN n'ait changé...

Vincent Colot : En effet, il s'agit bien d'épigénétique ! On s'est aussi aperçu que le transposon ciblait préférentiellement certains locus particuliers, où des gènes sont impliqués dans la réponse aux changements environnementaux comme des attaques d'agents pathogènes ou des chocs thermiques. La mutagenèse induite par ce transposon n'est donc pas du tout aléatoire. Il y a peut-être eu une coévolution de plusieurs mécanismes : des transposons qui ne sont activés qu'en condition de stress – même si on ne sait pas déclencher leur mobilité de cette façon en laboratoire – et qui ciblent des gènes dont l'expression a besoin d'être régulièrement ajustée pour mieux répondre au stress.

Et dans la nature ?

Vincent Colot : On a trouvé une situation similaire en recherchant, dans la base de données du projet de séquençage 1001 Genomes d'*A. thaliana*, une insertion toute récente dans le gène *FLC*, qui est un répresseur clé de la floraison. La souche possédant cette insertion provient de Brive alors que les autres souches contenant un gène *FLC* très semblable, mais sans insertion, sont trouvées pour la plupart en Amérique du Nord, dans des régions aux hivers rigoureux. Or nous nous sommes aperçus que si toutes ces souches déclenchent la floraison après un épisode hivernal, qui induit la répression stable du gène *FLC*, seule la souche de Brive, aux hivers bien plus cléments, peut également fleurir sans froid préalable dès lors qu'elle est soumise à un choc thermique. Des travaux encore préliminaires suggèrent que c'est bien le transposon inséré dans le gène *FLC* qui confère à cette souche la propriété de fleurir ainsi. De fait, ce transposon perd sa méthylation après un choc thermique, ce qui suffit, comme le froid hivernal, à inhiber de manière stable l'activité du gène *FLC* (voir la figure ci-dessus).

Edith Heard : C'est intéressant par rapport au changement climatique ou d'autres stress



Une souche de la plante *Arabidopsis thaliana* poussant à Brive porte, dans un gène qui contrôle le temps de la floraison, un transposon sensible à la chaleur. Ce transposon est absent du gène chez les plus proches cousines de la souche de Brive, qui, comme celle provenant du Michigan, ont besoin d'une période de grand froid pour fleurir au printemps. L'équipe de Vincent Colot a montré que la présence du transposon confère la capacité de fleurir après un choc de chaleur. En d'autres termes, le transposon, via la modulation du contrôle épigénétique que la chaleur exerce sur lui, aurait permis à la souche de Brive de s'acclimater aux doux hivers corréziens.

environnementaux : les transposons créent un réservoir d'individus différents qui vont réagir différemment à une vague de chaleur ou de froid, et ne mourront peut-être pas tous.

Vincent Colot : Et peut-être le choc thermique induit-il aussi des transpositions, même si on ne sait pas les voir, et génère-t-il de cette façon de la diversité génétique, comme évoqué par Edith pour les mouches hawaïennes. Dans ce contexte, l'évolution implique bien des changements de la séquence de l'ADN.



Chez les abeilles *Apis mellifera*, la larve de la future reine est nourrie de gelée royale, sécrétée par les abeilles, tandis que les autres mangent du pain d'abeille, un mélange de pollen et de miel. On n'a compris que récemment que la gelée royale n'est pas le seul acteur de leur plasticité phénotypique. Dans le pain d'abeille, de petits ARN issus des plantes interviendraient dans le déclenchement du programme « ouvrière »...

L'épigénétique n'est-elle pas quand même un puissant moteur de l'évolution ?

Vincent Colot : Si, mais plutôt de manière indirecte, en modulant la capacité des transposons à être mobilisés, notamment en réponse aux changements brusques de l'environnement, et en permettant ainsi la création rapide de mutations potentiellement adaptatives, pour certaines parce qu'elles-mêmes épigénétiquement sensibles. C'est en tout cas ce que l'exemple de l'insertion du transposon dans le gène *FLC* de la souche de Brive suggère.

Quels aspects vous paraissent particulièrement intéressants dans les recherches actuelles sur l'épigénétique au regard de l'évolution ?

Edith Heard : Une voie intéressante concerne ce qu'on appelle la plasticité phénotypique, qui permet une adaptation rapide, programmée, à un changement environnemental, comme celle des criquets pèlerins en fonction du nombre de congénères à proximité. Comment des individus ayant le même génome peuvent-ils avoir des phénotypes si différents selon



l'environnement dans lequel ils se trouvent?
Les stratégies et mécanismes utilisés sont peu connus encore. Qu'il s'agisse de comprendre comment un poisson change de mâchoire en fonction de la nourriture disponible, ou comment un lézard des sables devient noir sur de la lave, on est encore loin d'avoir une réponse. On n'a pas simplement affaire à un gène qui serait méthylé ou non. En fait, on pense qu'à la base de la plasticité phénotypique, il y a une fluctuation d'expression des gènes. Dans une cellule, un gène est exprimé à un certain niveau qui diffère de celui de la cellule voisine. Puis de l'épigénétique pourrait contribuer à fixer tout cela.

Par exemple, selon la richesse du milieu de culture de levures de boulanger, leur capacité de produire des spores varie. Plus le milieu est pauvre et plus la levure a de chances de sporuler. Des biologistes ont montré que la capacité de changer d'état est préexistante dans la population, et ils ont identifié le gène responsable de cette capacité. D'une cellule à l'autre, son expression fluctue beaucoup et, en conséquence, les cellules ne sporulent pas en même temps. Ils ont aussi montré que c'est l'état de la chromatine autour de la région où commence la lecture du gène qui fluctue d'une cellule à l'autre, produisant cette variabilité d'expression du gène. L'avantage se situe ici à l'échelle de la population: les cellules pas encore entrées en sporulation peuvent

L'uta, un lézard du sud-ouest des États-Unis, a en général la couleur du sable qu'il habite, mais ceux qui vivent sur le volcan Pissgah, en Californie, sont noirs comme la lave refroidie qui les héberge. En revanche, si un lézard de Pissgah (à gauche) vit pendant quatre mois dans du sable clair, il reprend une couleur sableuse (à droite). Ammon Corl, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont récemment montré que chez les lézards de Pissgah, deux gènes régulant la production de mélanine sont mutés. Selon eux, la plasticité phénotypique de l'uta l'aide à s'adapter à un nouvel environnement, puis une mutation soumise à une forte sélection positive vient fixer le phénotype le mieux adapté.

prendre le relais en cas de retour d'un milieu riche en nutriments. À ma connaissance, c'est un des rares cas de plasticité phénotypique où l'on connaît le gène et le mécanisme.

Quel autre aspect vous semble particulièrement important en ce moment?

Edith Heard : Le rôle éventuel des transposons et de leurs reliquats dans l'adaptabilité; à quel point ces insertions servent de modulateurs de l'expression des gènes absolument critiques pour l'adaptation à des environnements différents. Et les plantes sont peut-être des exemples plus frappants que les animaux, car elles sont obligées d'exploiter ce qu'elles ont, alors que les animaux peuvent se déplacer.

Vincent Colot : Oui, et en particulier, il est important de comprendre quelles sont les modalités qui président au relâchement du contrôle épigénétique et à la mobilisation des transposons, et comment tout cela s'inscrit dans un processus qui favoriserait la création de mutations adaptatives en réponse à des changements brutaux de l'environnement.

Donc par rapport aux visions de Lamarck et Darwin, on est finalement un peu entre les deux?

Vincent Colot : On fait dire tout et n'importe quoi à Lamarck. Mais si l'on veut bien accepter que l'environnement peut agir, non seulement comme un filtre, mais également comme un moteur dans la génération de la variation génétique, qui plus est comme un orienteur – imparfait – de celle-ci, le rapprochement devient intéressant.

Edith Heard : Une question que l'on se pose souvent est la suivante: un organisme peut-il acquérir des traits hérités, comme l'a proposé Lamarck? La réponse est non. En revanche, comme l'a suggéré la biologiste américaine de l'évolution Mary Jane West-Eberhard en 2003 en s'appuyant sur des travaux sur des guêpes et des papillons, la plasticité phénotypique pourrait ouvrir la voie à des ajustements permanents, sous la forme de changements génétiques. Lamarck avait raison de dire qu'il fallait des réponses flexibles et rapides à l'environnement – comme cette plasticité phénotypique qui pourrait être le moteur de changements plus lointains –, mais si certains traits adaptatifs deviennent permanents, comme dans le cas de la couleur noire des lézards des sables, c'est parce que des mutations (peut-être liées à l'activité des transposons?) ont fixé ces traits qui étaient plastiques auparavant. On parle d'assimilation génétique. Les mutations sont donc les moteurs ultimes de l'évolution. ■

**Propos recueillis
par Marie-Neige Cordonnier**

POUR LES FRANÇAIS LE PLAISIR D'ÊTRE EN MOYENNE 27 MINUTES*

*Les lecteurs de magazines consacrent
en moyenne 27 minutes par jour
au plaisir de la **Presse Magazine.**

INFORMER. DÉCOUVRIR. APPROFONDIR.

PRIX RELAY DES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2019

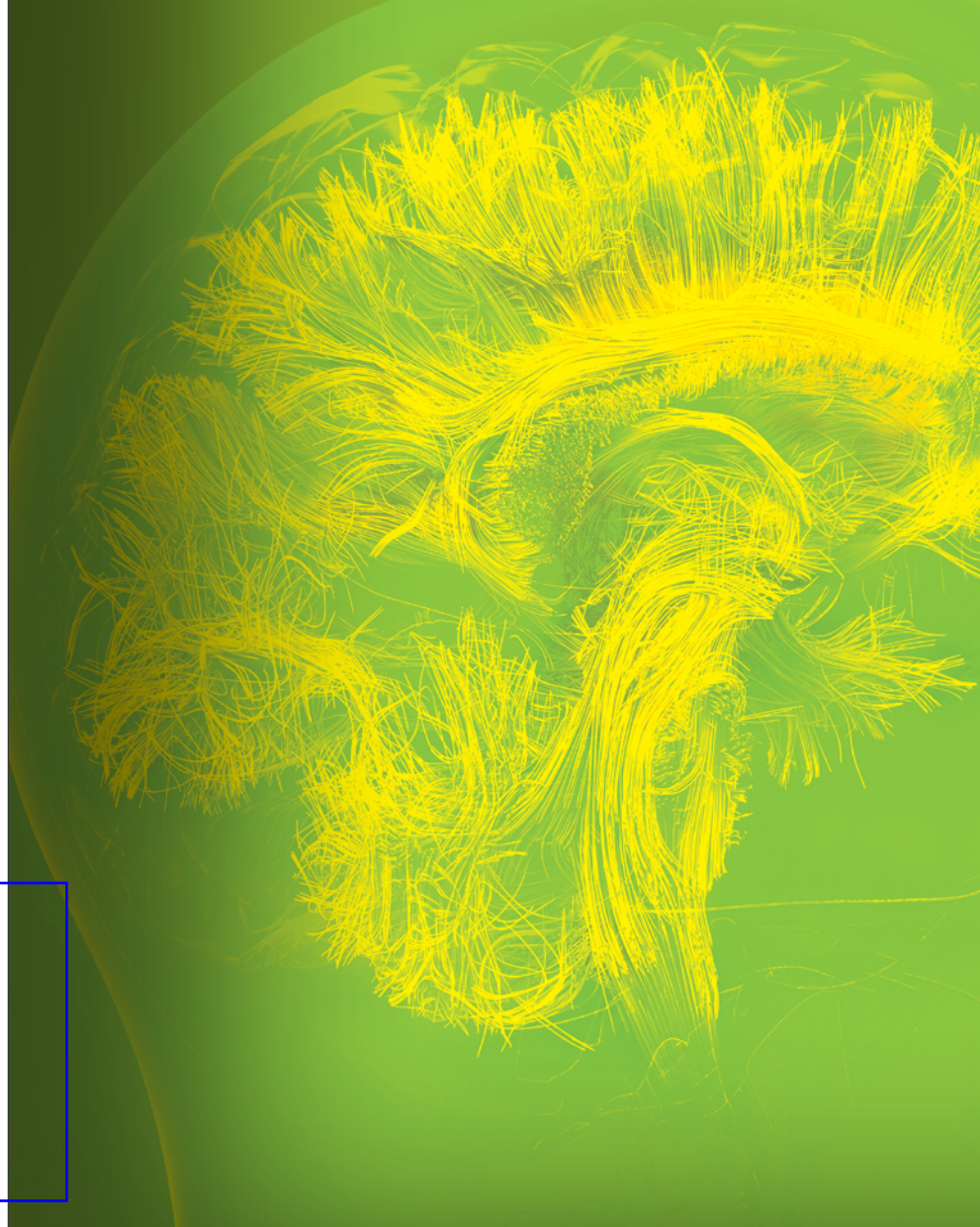
sep
SYNDICAT
DES ÉDITEURS
DE LA PRESSE
MAGAZINE

RELAY.


LES MAGAZINES
DE L'ANNÉE
2019

Découvrez chez **RELAY** à partir du 16 mai, les magazines
les plus talentueux et les plus audacieux de l'année.

N°500



Il y a cent vingt ans, Freud publiait son *Interprétation des rêves*. Sa théorie, qui attribue à l'inconscient un rôle caché mais capital dans la vie mentale de l'individu, imprègne encore largement la culture occidentale. Sur le plan scientifique, en revanche, l'affaire est tout autre. La psychologie expérimentale et les neurosciences démentent l'idée que les processus inconscients constitueraient un système régissant de façon autonome notre comportement. L'inconscient n'apparaît pas comme une partie cachée de notre vie mentale, mais plutôt comme le fondement neural de son corollaire, la conscience. Laquelle, de son côté, est de mieux en mieux caractérisée, grâce notamment aux techniques de neuro-imagerie.

Vers une théorie de l'inconscient?

L'ESSENTIEL

> Comme le montre notamment le phénomène de « vision aveugle », le cerveau peut traiter certaines informations de façon inconsciente.

> Une question se pose : l'inconscient joue-t-il un rôle cognitif, qui ferait de lui un acteur important de la vie mentale ?

> Cette question a fait l'objet de nombreuses études expérimentales, qui se heurtent cependant à de grandes difficultés méthodologiques.

> Ces travaux dessinent un inconscient qui constitue plutôt la base neurale de la conscience, et non une partie cachée de notre vie mentale.

LES AUTEURS



AXEL CLEEREMANS
directeur de l'Institut
de neurosciences
de l'université libre
de Bruxelles, en Belgique



ADELAÏDE DE HEERING
postdoctorante à l'Institut
de neurosciences
de l'université libre
de Bruxelles

L'inconscient doit encore faire ses preuves

L'inconscient domine-t-il notre vie mentale ? Cette idée est aujourd'hui répandue, en raison notamment de l'influence des théories freudiennes. Mais les recherches menées depuis plusieurs décennies en psychologie expérimentale et en neurosciences nous amènent à repenser profondément l'inconscient et son rôle.

De toutes les métaphores de l'esprit, la plus célèbre est sans aucun doute l'image de cet iceberg flottant dans la mer et dont la partie émergée, représentant la conscience, est bien plus petite que la partie submergée, représentant, elle, les profondeurs de l'inconscient. Ce sont évidemment les écrits de Sigmund Freud qui se trouvent à l'origine de cette image qui fait maintenant partie de la culture populaire.

Aujourd'hui, différents champs de connaissance se sont approprié l'inconscient : la psychologie clinique évidemment, et en particulier les approches psychodynamiques, mais aussi les champs de la psychologie sociale, de la sociologie, des neurosciences cognitives, ou encore du marketing. Il est devenu commun d'entendre que c'est l'inconscient qui domine notre vie mentale et nos comportements, impression par ailleurs renforcée par le développement d'intelligences artificielles dénuées de conscience, mais capables de performances surhumaines dans des domaines tels que les

jeux de go ou d'échecs. La conscience que nous avons du monde ne serait alors plus qu'une sorte d'épiphénomène dont les forces causales deviennent difficiles à discerner.

L'inconscient est donc aujourd'hui dans l'air du temps... De l'hypnose aux zombies en passant par les vampires, nous semblons adorer les histoires qui nous donnent le sentiment de ne pas être maîtres de nos actes. Nous craignons également d'être manipulés par des forces que nous ne contrôlons pas.

On se rappellera, dans ce contexte, la fameuse étude de l'Américain James Vicary qui, en 1957, prétendit avoir démontré que des images subliminales glissées lors de la projection d'un film avaient incité les spectateurs à consommer davantage de Coca-Cola et de popcorn. Si Vicary révéla plus tard que son étude n'était que pure invention, l'idée qu'il est possible de manipuler les gens, à leur insu, a marqué les esprits. Elle mena notamment, à la fin des années 1980, des parents à intenter un procès au chanteur britannique de rock Ozzy Osbourne, à qui il fut reproché d'avoir inséré sur la bande-son d'une de ses chansons un



L'inconscient, partie immergée de l'iceberg représentant la vie mentale ? Cette idée répandue ne correspond pas à ce que les neurosciences nous disent.

message satanique qui, écouté à l'envers, aurait incité leur fils à mettre fin à ses jours. À la même époque s'est aussi développée toute une industrie de «cassettes subliminales» dont les messages inaudibles, superposés à une bande sonore à caractère relaxant, auraient donné l'espoir à leurs auditeurs d'arrêter de fumer, d'apprendre le chinois ou de perdre du poids.

Au-delà de ces fumisteries, de nombreuses études sont venues soutenir l'idée que le traitement inconscient d'informations, même complexes, est possible. Les exemples les plus clairs proviennent de la pathologie, et un cas frappant est celui du syndrome de la vision aveugle.

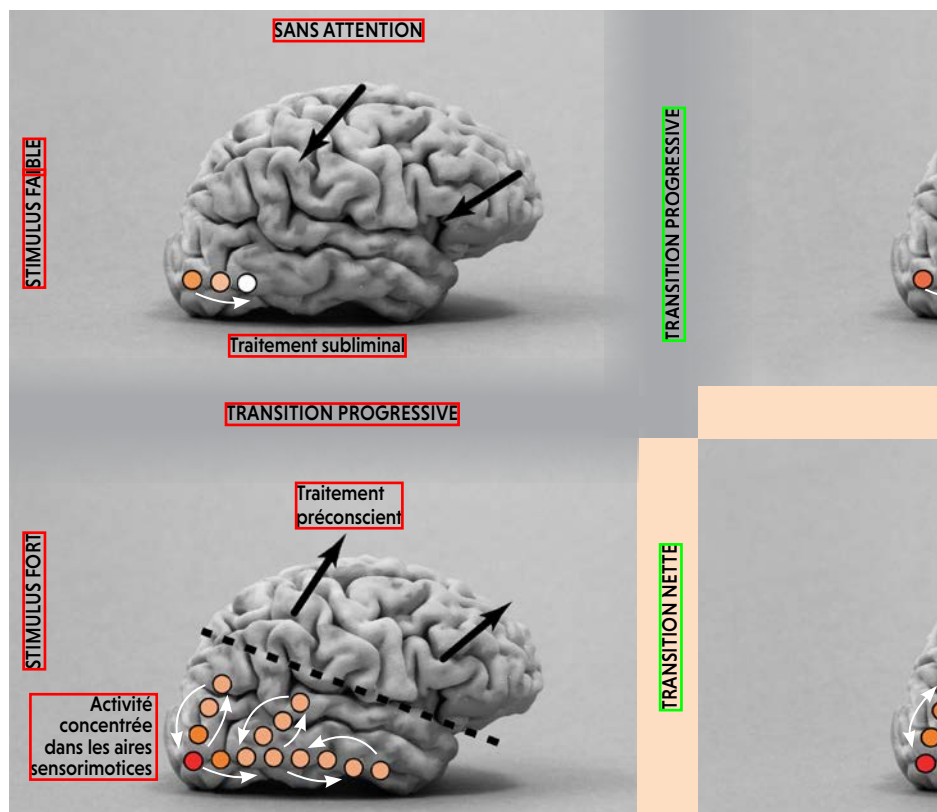
Ce syndrome a été documenté pour la première fois chez le macaque dans les années 1970 par le chercheur britannique Nicholas Humphrey, puis chez l'humain par un autre Britannique, Larry Weiskrantz. Il survient souvent à la suite d'un accident vasculaire cérébral et est caractérisé par la destruction partielle ou totale du cortex occipital où se trouvent les aires visuelles primaires. Les patients rapportent être devenus aveugles, mais se révèlent souvent capables de performances qui semblent exiger la vision consciente: éviter des obstacles qui se trouvent devant eux; adapter la forme de leur main à la forme des objets qu'ils cherchent à saisir et qu'ils disent néanmoins ne pas percevoir; deviner, mieux que le hasard ne le prédirait, la catégorie d'un objet qu'on leur présente...

Ces données spectaculaires montrent que de nombreuses fonctions associées à la vision peuvent se déployer sans conscience. Mais qu'en est-il chez le sujet sain? Et plus généralement, au-delà du traitement de certaines informations, l'inconscient joue-t-il un rôle cognitif faisant de lui un véritable acteur de notre vie mentale?

A LA RECHERCHE DE L'INCONSCIENT COGNITIF

Le concept d'inconscient en tant que tel est apparu assez tardivement, avec les travaux de Freud bien entendu, mais aussi avec le philosophe allemand Eduard von Hartmann et sa *Philosophie des Unbewussten* (1869) qui nourrit, trente ans plus tard, *L'Interprétation des rêves* de Freud. Il intéressera par ailleurs les chercheurs dès les débuts de la psychologie scientifique.

Ainsi, Charles Sanders Peirce et Joseph Jastrow, deux pionniers de la psychologie expérimentale américaine, ont conduit en 1884 une étude dans laquelle ils se sont mutuellement demandé si la pression exercée sur un doigt était plus ou moins forte que la pression exercée sur un autre doigt. Les participants (eux-mêmes donc!) étaient en outre amenés à indiquer la confiance qu'ils avaient en leur décision en utilisant une échelle à quatre points. Peirce et Jastrow démontrèrent ainsi que la capacité à

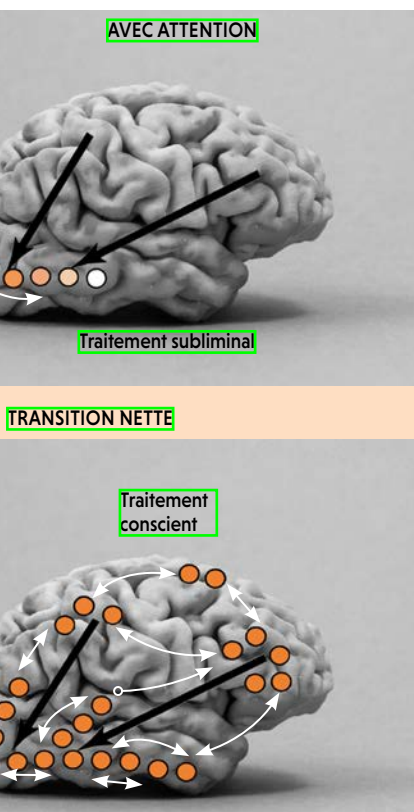


distinguer de petites différences de pression était meilleure que le hasard ne l'aurait prédit, même quand la personne rapportait n'avoir aucune confiance dans sa décision; autrement dit, la perception peut être précise même en l'absence de conscience.

Quelques années plus tard, en 1898, le psychologue d'origine russe Boris Sidis mit au point une expérience similaire pour laquelle il demanda à ses participants de juger si un stimulus visuel vu de loin était une lettre ou un chiffre. Il constata que, bien que les sujets rapportaient ne pas être capables de discerner le stimulus, leurs réponses, quand on leur demandait de choisir même s'ils avaient le sentiment de ne rien voir, étaient souvent exactes.

Il faudra attendre les années 1970 pour que de nouvelles études alimentent ce champ de recherche déjà controversé (voir à ce propos les revues critiques de Charles Eriksen, en 1960, et de Norman Dixon, en 1971). Le psychologue anglais Anthony Marcel en sera le pionnier. Ses études utilisent une technique bien connue de la psychologie expérimentale, celle de l'«amorçage». Le principe en est simple et se fonde sur l'observation que la réponse à un stimulus quelconque est facilitée par la présentation préalable de ce même stimulus ou d'un autre stimulus qui lui est associé. Par exemple, décider si la chaîne de caractères DOCTEUR est un mot ou pas sera facilité par la présentation, quelques centaines de millisecondes auparavant, de la chaîne INFIRMIÈRE. Le mot «infirmière» est en effet

Stanislas Dehaene et ses collègues ont proposé en 2006 ce schéma qui distingue les principaux états du cerveau lorsqu'il traite un stimulus visuel. L'intensité de couleur des ronds reflète l'intensité de l'activité dans les aires locales du cerveau. Les petites flèches incurvées illustrent les interactions de ces aires. Les flèches noires en gras indiquent la direction globale de l'attention (vers le stimulus, ou s'en écartant).



associé au mot «docteur» par son sens et amorce donc le traitement de ce dernier.

En utilisant cette méthode, Anthony Marcel a montré que l'amorce est susceptible d'influencer le traitement de la cible même quand elle n'est pas perçue consciemment par le sujet. Afin d'assurer que l'amorce soit invisible, il a recouru aux techniques de masquage, qui consistent à faire suivre l'amorce d'un masque visuel typiquement composé de morceaux de lettres enchevêtrées. Nous reviendrons sur ce point plus loin, ainsi que sur la question centrale de savoir comment s'assurer que les participants n'ont pas conscience de l'amorce; il s'agit là de défis fondamentaux qui ont poussé le psychologue belge Daniel Holender à publier, en 1986, un article critique dans lequel il remet en cause le bien-fondé méthodologique des recherches d'Anthony Marcel, discréditant son travail ainsi que l'ensemble de la littérature consacrée à la perception subliminale.

L'arrivée des méthodes d'imagerie cérébrale dès le milieu des années 1980 changera les choses. En 1998, Stanislas Dehaene et ses collaborateurs, en France, publièrent la première étude répondant à la question des mécanismes neuraux sous-jacents au phénomène d'amorçage subliminal. En 2005, John-Dylan Haynes et Geraint Rees, du University College London, montrent qu'il est possible de décoder l'activité cérébrale suscitée dans le cortex visuel par un stimulus que le sujet dit ne pas avoir perçu, avec

est intégralement causée par l'activité du cerveau en interaction avec lui-même, le monde et autrui, il va de soi que l'on doit s'attendre à retrouver dans l'activité du cerveau lui-même les prémices de notre conscience.

De nombreuses études de psychologie sociale ont également contribué à l'idée que la plupart de nos comportements sont enracinés dans des mécanismes non conscients. Par exemple, les chercheurs américains Lawrence William et John Bargh ont montré en 2008 que le simple fait de tenir une tasse contenant un liquide chaud ou froid dans la main influençait l'impression que nous avions de la personne en face de nous. En 2012, une autre étude, d'Asael Sklar et ses collègues, à l'université hébraïque de Jérusalem, a suggéré que nous sommes capables de réaliser des opérations arithmétiques simples sur des nombres que nous rapportons pourtant ne pas percevoir. Dernier exemple: selon une étude publiée en 2006 par le chercheur néerlandais Ap Dijksterhuis, on prend de meilleures décisions quand on évite de réfléchir consciemment à un choix complexe, comme acheter un appartement ou une voiture.

UN INCONSCIENT ROI?

De telles études ont amené certains chercheurs à défendre l'idée que nous sommes capables de «penser inconsciemment». On pourrait ainsi conclure que l'inconscient est un système capable d'effectuer le même traitement de l'information que la conscience. En particulier, il serait capable de manipuler des représentations symboliques telles que des nombres ou des mots et d'en déterminer la signification. De la même manière que la psychanalyse nous a amenés à considérer que l'inconscient constituerait un vaste réservoir de pulsions, de désirs inassouvis, de souvenirs traumatisants, tous refoulés dans le but de préserver l'intégrité des procédés conscients, les sciences cognitives et la psychologie sociale nous dépeignent parfois l'inconscient comme un «système» à part entière, dont l'activité autonome serait elle aussi susceptible d'influencer notre comportement.

Cette perspective d'un inconscient «puissant» a fait l'objet de nombreuses critiques, tant méthodologiques que conceptuelles. Ainsi, de très nombreuses études du domaine n'ont jamais été répliquées avec succès, ce qui jette évidemment un doute sur leur validité. Ce sont ces échecs qui se trouvent à l'origine de la crise de la répliquabilité en psychologie.

Mais l'idée d'un inconscient fort a également suscité des attaques conceptuelles. Par exemple, dans son ouvrage de 1992 *The Rediscovery of the Mind* («La Redécouverte de l'esprit»), le philosophe américain John Searle a directement attaqué la conception freudienne d'un inconscient symbolique, en arguant qu'il

On peut prédire plusieurs secondes à l'avance le choix que fera un participant

suffisamment de précision pour déterminer quel stimulus, choisi parmi deux, lui a été montré. Et comme l'ont démontré en 2008 Marcel Brass, de l'université de Gand, et ses collègues, on peut de la même façon prédire le choix d'un participant jusqu'à dix secondes avant qu'il ne prenne lui-même conscience de sa décision...

De telles études suggèrent qu'il est possible de reconstruire la perception même subliminale d'un sujet, voire d'en prédire le comportement futur, à partir de l'analyse de son activité cérébrale. Faut-il s'en étonner? Si notre vie mentale

est absurde d'imaginer un inconscient qui fonctionnerait exactement comme le conscient, mais sans la conscience. Selon John Searle, la seule conception possible d'une représentation inconsciente est celle d'une représentation disposée à devenir consciente; c'est ce qu'il appelle le «principe de connexion».

Plus récemment, le psychologue cognitiviste Nick Chater, de l'université de Warwick, en Grande-Bretagne, s'est lui aussi attaqué à l'idée d'un inconscient «profond»; pour lui, au contraire, «l'esprit est plat», ce par quoi il veut dire que chaque acte mental est une création instantanée qui émerge de l'activité du cerveau plutôt que le résultat d'un traitement inconscient. Dans son livre *Le Nouvel Inconscient* (2006), le neurologue français Lionel Naccache a, tout en défendant l'idée d'un inconscient riche et élaboré, aussi remis en cause les idées de Freud, non pas en les rejetant dans leur intégralité, mais plutôt en argumentant que des concepts tels que le refoulement ou un inconscient véritablement symbolique sont incompatibles avec les acquis actuels des neurosciences cognitives.

DIFFÉRENTES THÉORIES DE L'INCONSCIENT

Ces différents points de vue sur l'inconscient reviennent en quelque sorte à poser la question suivante: à quoi pourrait donc bien servir la conscience si l'inconscient est capable de réaliser exactement les mêmes fonctions qu'elle? Répondre à cette question exigerait que l'on connaisse précisément tant les fonctions de la conscience que ses mécanismes. Or c'est loin d'être le cas aujourd'hui. Différentes théories s'affrontent sans que l'on ne parvienne à concevoir des expériences susceptibles de les départager une fois pour toutes.

Il est impossible ici de faire le tour des positions en présence, mais il est utile de distinguer entre théories «de premier ordre» et théories «de second ordre». Les premières sont fondées sur l'idée que la conscience est une propriété de certaines représentations neurales, comme leur stabilité dans le temps ou la présence de boucles récurrentes. Ces théories ont bien du mal à expliciter quelles sont les différences entre traitement avec et sans conscience.

À l'inverse, les secondes sont fondées sur l'idée que la conscience dépend de mécanismes particuliers. Il en est ainsi de la théorie de l'espace de travail neural (voir l'article de Lionel Naccache pages 74 à 80), probablement celle qui réalise le meilleur consensus aujourd'hui; elle suppose qu'une représentation devient consciente à partir du moment où son traitement prend place dans un réseau cérébral distribué dans le cortex et dont la fonction essentielle est de rendre cette représentation globalement accessible au cerveau.

L'inconscient est alors tout simplement relégué à l'ensemble des traitements qui restent en dehors de cet espace de travail neural. La théorie distingue cependant entre traitement *subliminal* ou *inconscient*, pour lequel le stimulus traité n'a pas suffisamment d'énergie pour engager l'espace de travail neural, et le traitement *préconscient*, pour lequel le traitement d'un stimulus, suffisamment intense pour être traité consciemment, est cependant empêché par manque d'attention.

La théorie des pensées d'ordre supérieur, que l'on doit au philosophe américain David Rosenthal, suppose quant à elle qu'une représentation mentale est consciente à partir du moment où le sujet est conscient de cette représentation. Autrement dit, chaque représentation mentale consciente le serait en raison de l'existence (inconsciente!) d'une «pensée d'ordre supérieur» selon laquelle «je suis conscient d'être dans cet état mental». Dans cette perspective, la conscience fonctionnerait comme une sorte de système de surveillance qui analyserait en permanence, un peu à la manière d'un radar, la dynamique de l'activité cérébrale.

Cette question des rapports entre conscient et inconscient, ainsi que celle de l'étendue de l'inconscient et de sa structure, sont donc loin d'être résolues. Une enquête informelle réalisée récemment auprès de 87 spécialistes par Megan Peters et Hawkan Lau, de l'université de Californie à Los Angeles, montre par exemple que si 94% d'entre eux pensent qu'il est possible de traiter des informations sans conscience, un tiers seulement se dit convaincu que l'existence de tels traitements subliminaux a bel et bien été prouvée expérimentalement...

Il est vrai qu'au-delà de la pathologie, qui offre des démonstrations incontestables de la possibilité de traitements inconscients complexes, les données expérimentales récoltées auprès de sujets sains sont peu convaincantes. Cela tient notamment au fait que l'étude de la cognition inconsciente pose d'importants défis méthodologiques.

DES DÉFIS MÉTHODOLOGIQUES

Le défi principal auquel sont confrontés les chercheurs est celui de devoir démontrer l'absence de conscience. Or il est tout simplement impossible de prouver l'absence puisque l'absence d'une preuve ne constitue en rien une preuve de l'absence. En outre, on oublie parfois qu'il est impossible, chez le sujet sain, «d'éteindre la conscience» – la conscience des participants est toujours engagée, même quand on tente de faire en sorte qu'ils ne perçoivent rien. Il est donc illusoire d'imaginer qu'il est possible de concevoir une situation expérimentale dans laquelle les sujets se comporteraient comme de purs zombies: chaque tâche implique

L'INCONSCIENT EN QUELQUES DATES

1714

Leibniz, dans sa *Monadologie*, distingue perception (non consciente) et conscience.

1869

Eduard von Hartmann publie *Die Philosophie des Unbewussten*.

1884

Aux États-Unis, Charles Sanders Peirce et Joseph Jastrow effectuent des expériences mettant en évidence une perception non consciente.

1899-1900

Sigmund Freud publie *L'Interprétation des rêves*.

1974-1983

Publication d'études de psychologie expérimentale d'Anthony Marcel, où est mise en œuvre la technique de l'amorçage.

1986

Daniel Holender critique la méthodologie de l'ensemble des études expérimentales de la perception subliminale.

Vers 1990

Développement des techniques d'imagerie cérébrale (IRM, TEP, MEG, etc.).

1998

Première étude de Stanislas Dehaene et ses collègues sur les mécanismes neuraux de l'amorçage subliminal.

2018

Avec ses collègues, Vincent Taschereau-Dumouchel montre que l'on peut contrôler intentionnellement l'activation d'une représentation inconsciente.

nécessairement des processus conscients et des processus inconscients.

Un deuxième défi est de s'assurer que les tests que l'on utilise afin de déterminer si le sujet était conscient d'un état de choses sont suffisamment sensibles. Il faut ici distinguer entre rapports subjectifs et mesures objectives. Les rapports subjectifs, *via* lesquels on demande aux participants de rapporter leur expérience subjective du stimulus (vu/pas vu), présentent l'inconvénient d'être difficilement quantifiables et sujets à des biais individuels. En outre, comme l'on fait remarquer les psychologues sociaux américains Richard Nisbett et Timothy Wilson dès 1977, nous avons souvent tendance à affabuler les rapports verbaux que nous fournissons à propos de nos propres états mentaux – constat qui remet en cause le statut accordé à ce que disent les participants quand on les interroge à propos de leurs propres états mentaux.

Ces difficultés ont amené de nombreux chercheurs à adopter une autre manière d'établir si un stimulus est effectivement inconscient: on demande aux participants de réagir de façon comportementale à la présence d'un stimulus, par exemple en indiquant par une pression de touche si un nombre présenté très rapidement est plus grand ou plus petit que 5.

Une épineuse question supplémentaire se pose cependant tant pour les mesures subjectives qu'objectives de la conscience: ces

Différents paradigmes expérimentaux font appel à différentes manières d'éliminer certaines informations de notre conscience. On peut distinguer trois stratégies, toutes fondées sur l'idée que la conscience est un système de surveillance ressemblant grossièrement à un radar aéronautique. Comment tromper un tel radar? Une première stratégie consiste à affaiblir le signal en déployant, par exemple, un avion suffisamment petit pour qu'il ne soit pas détecté. Une deuxième stratégie consiste à détourner l'attention de l'opérateur radar en déployant, par exemple, de nombreux leurres. Une troisième stratégie consiste à changer le récit en faisant par exemple croire à l'opérateur du radar, non pas qu'il n'y a rien là-bas, mais plutôt que ce qui existe ne correspond pas à ce qu'il pense. Examinons ces trois stratégies tour à tour.

AFFAIBLIR LE STIMULUS

Les expériences de Sidis évoquées plus haut illustrent qu'un stimulus dit subliminal, donc non perçu par le sujet, est susceptible d'influencer ses réponses, et donc d'exercer un effet causal sur son comportement. Une telle démonstration revient à prouver que la perception ne nécessite pas forcément de conscience. Une manière de faire, et la plus usitée, consiste à affaiblir le stimulus, ce qui peut être obtenu en en réduisant le contraste (par rapport au fond sur lequel il est présenté) ou la durée de sa présentation à l'écran (quelques millisecondes), ou encore en le faisant précéder ou suivre dans un intervalle de temps très bref par d'autres stimuli nommés «masques», comme dans les expériences d'Anthony Marcel.

D'autres techniques de masquage consistent à présenter en même temps que le stimulus lui-même des stimuli distracteurs qui l'entourent, ou encore à présenter à un œil une configuration dynamique d'éléments colorés très lumineux alors que le stimulus d'intérêt lui-même est présenté à l'autre œil. Contrairement aux autres, cette dernière méthode présente l'intérêt de masquer le stimulus pendant plusieurs secondes.

Un problème essentiel soulevé par ce type d'études est le «dilemme force-efficacité»: comment s'assurer que l'amorce est suffisamment dégradée pour être inaccessible à la conscience, mais suffisamment efficace pour influencer le comportement? La question reste sans réponse claire...

Afin d'explorer les effets d'une présentation subliminale sans recourir au masquage, nous avons récemment développé, à l'université libre de Bruxelles, un équipement permettant d'afficher des stimuli visuels sur un écran pendant des durées aussi courtes que 20 microsecondes. Ce dispositif permet donc de «flasher» une image tellement rapidement que le sujet ne prend pas conscience de sa présence à l'écran et

Aucune des stratégies expérimentales ne garantit qu'un contenu est inconscient

mesures sont-elles bien exclusives et exhaustives? Autrement dit, est-on certain que la mesure de la conscience que l'on a choisie ne mesure d'une part que les contenus conscients (exclusivité) et d'autre part qu'elle mesure bien tous les contenus de la conscience (exhaustivité)? Un rapport verbal, par exemple, est susceptible de ne pas être exhaustif. À l'inverse, une mesure objective, telle que la discrimination forcée, est susceptible quant à elle d'être influencée tant par des contenus conscients que par des contenus inconscients...

ce, sans utilisation d'aucun masque. Qu'observe-t-on alors dans une situation d'amorçage?

Nos premiers résultats suggèrent que dans de telles conditions expérimentales, les effets comportementaux suivent la visibilité: on n'observe un effet d'amorçage que lorsque les sujets disent avoir perçu le stimulus. De façon surprenante, l'écart entre absence de perception et perception est très faible: à 175 microsecondes, il n'y a ni visibilité ni amorçage, alors qu'à 350 microsecondes, le stimulus est rapporté comme visible et on observe dans ce cas un effet d'amorçage. Cela suggère que l'effet d'un masque serait un effet attentionnel plutôt qu'un effet de la dégradation du stimulus.

DÉTOURNER L'ATTENTION

Une deuxième stratégie permettant de rendre un stimulus invisible consiste tout simplement à détourner l'attention du sujet. On sait que la perception consciente dépend à la fois des qualités du stimulus (sa durée, son contraste) et de l'attention qu'on porte à une situation. Le phénomène de «cécité au changement» (par exemple quand on ne perçoit pas qu'un objet s'est rajouté à une scène dans un film) est sans doute l'illustration la plus claire de l'importance de l'attention dans la prise de conscience.

Ainsi, dans une expérience devenue célèbre, les chercheurs américains Daniel Simons et Christopher Chabris ont, en 1999, demandé à leurs participants de visionner un film dans lequel on voit deux équipes de trois joueurs (trois habillés en noir, trois habillés en blanc) s'échanger une balle de basket dans un espace confiné. On leur demande de compter le nombre de fois que les joueurs habillés en blanc s'échangent leur balle. À l'insu des sujets, un septième acteur portant un costume de gorille pénètre lentement le champ de la caméra par la droite et s'arrête au milieu de la scène pour s'y battre la poitrine avant de ressortir du champ par la gauche. À la grande surprise de tous, seuls quelques participants rapportent avoir remarqué quoi que ce soit d'inhabituel. Or il suffit de leur demander de visionner à nouveau le film sans compter les échanges de balle pour que tous perçoivent immédiatement l'intrus! Cette expérience dite du gorille invisible a maintenant fait le tour du monde dans d'innombrables formations visant à faire prendre conscience aux gens qu'ils ont du mal à admettre que leur perception du monde est incomplète.

Il est également possible de faire disparaître un stimulus *via* d'autres méthodes, comme le clignement attentionnel: on manipule directement l'attention du sujet en lui demandant de repérer, dans une séquence de stimuli présentés les uns après les autres (entre 6 et 20 items par seconde), deux stimuli particuliers, qui se distinguent des autres par leur couleur ou par leur identité. Quand deux

a



b



Des expériences menées par Andrea Alamia et ses collègues ont mis en évidence un processus d'apprentissage inconscient. Les participants devaient fixer une croix sur un écran, puis déterminer la direction globale, droite ou gauche, dans laquelle se déplace un nuage de points animés de mouvements divers (a). À l'insu d'eux, la couleur des points du nuage était associée à sa direction, sauf pour l'une des trois couleurs utilisées (b). Les résultats des tests ont montré que les participants ont tout de même appris à associer la couleur à la direction, même s'ils n'en étaient pas conscients.

cibles surviennent à intervalle suffisamment proche l'un de l'autre (quelques centaines de millisecondes), les participants n'ont pas conscience de la deuxième cible.

L'ensemble de ces études pose un second dilemme, dit de l'observateur, qui se rapporte au fait de ne pouvoir poser la question au sujet de ce qui a été perçu qu'en fin d'expérience. L'interroger plus tôt attirerait en effet immédiatement son attention sur ce que l'on cherche précisément à maintenir hors de sa conscience.

CHANGER L'HISTOIRE

La troisième stratégie est plus subtile. Elle consiste à décrire la situation que le participant perçoit d'une manière différente de ce qu'elle est en réalité. On pense ici aux effets placebo, à la suggestion, ou encore à l'hypnose – autant de méthodes qui permettent de modifier la façon dont un sujet se représente les choses consciemment.

C'est une telle stratégie qui a été mise en œuvre dans une série d'expériences menées en 2016 par Andrea Alamia, actuellement au centre de recherche Cerveau et cognition, à Toulouse, et ses collègues, expériences qui ont mis en évidence un phénomène d'apprentissage inconscient. On demandait aux participants de détecter la direction (gauche ou droite) dans laquelle se déplaçait la majorité des points composant un nuage de points tous en mouvement

dans diverses directions. Lors de certains essais, l'ensemble des points était coloré de la même couleur (en vert, en rouge ou en bleu), et l'on demandait parfois aux sujets de rapporter cette couleur. Une information ignorée des sujets était que deux des trois couleurs étaient associées à la direction, c'est-à-dire à la réponse à fournir, tandis que la troisième était sans lien avec la direction. Il y avait donc un moyen très simple (observer la couleur) pour que les participants améliorent leurs performances dans ce test par ailleurs très difficile.

Or dans ces expériences, aucun sujet n'a déclaré avoir pris conscience du lien entre couleurs et réponses, mais les résultats montraient qu'ils avaient tous peu à peu appris (inconsciemment) l'association entre les deux. Si les sujets n'ont pas pris conscience de ce lien, c'est peut-être parce que la présence des couleurs était décrite aux participants comme une autre tâche, sans rapport aucun avec la première.

Que conclure de ce bref tour d'horizon ? Face aux phénomènes de cognition inconsciente – de la perception subliminale à l'apprentissage implicite –, deux attitudes sont possibles. On peut tout d'abord nier en bloc l'existence de ces phénomènes et considérer que tout ce qui fait partie de notre vie mentale est nécessairement conscient. Bien que cette perspective paraisse peu plausible, certains chercheurs la défendent avec force, épinglant non sans raison les nombreuses incertitudes méthodologiques qui continuent d'empoisonner le domaine, et attribuant donc les résultats observés à l'utilisation de mesures peu sensibles ou à l'influence de facteurs insuffisamment contrôlés. S'il est indéniable que le cerveau est capable de traiter des informations sans conscience, comme le prouve la vision aveugle, l'existence de telles capacités n'implique en rien l'existence d'un inconscient cognitif au sens fort ; autrement dit, on peut toujours considérer que de telles capacités relèvent non pas de la cognition, mais de simples facultés neurales, automatiques en quelque sorte.

L'autre attitude consiste à reconnaître que certains contenus, sémantiques par exemple, peuvent être traités sans conscience. Mais se pose alors la question toujours non résolue de savoir quelles sont les limites de cet inconscient cognitif. Sur la base des données existantes, on peut sans doute répondre que si de tels traitements sans conscience existent bel et bien, ils sont éphémères, superficiels et en général sans effets sur le comportement. Il y a donc peu de raisons de s'inquiéter de la possibilité que nous soyons manipulés. Il est sans doute beaucoup plus simple de manipuler la conscience par la persuasion ou la suggestion que de manipuler directement notre inconscient. Si iceberg il y a, il faut penser ses profondeurs immergées comme le fondement neural de la conscience plutôt que comme une partie cachée de notre vie mentale.

Une façon d'avancer dans ce débat est de considérer que la frontière entre conscient et inconscient est fluide et susceptible d'être profondément modifiée par des processus d'apprentissage et de plasticité prenant cours tout au long de la vie.

UNE FRONTIÈRE FLUIDE ENTRE CONSCIENT ET INCONSCIENT

Considérons par exemple la conduite automobile. Aux efforts intentionnels et conscients des débuts se substitue progressivement un ensemble d'actions automatisées qui prennent place avec tellement de fluidité que le conducteur expert peut sans difficulté entretenir une conversation avec son passager tout en maintenant la voiture sur la route. La conscience, dans un tel cas, sans être totalement absente, semble être devenue optionnelle. Mais il s'agit là d'une situation fort différente de celle qui intéresse la perception subliminale. Il s'agit donc de repenser les rapports entre conscient et inconscient d'une manière qui reflète le fait que la conscience que nous avons du monde est un phénomène dynamique, à différentes échelles temporelles. Un peu à la manière d'une rivière dont le cours modifie son propre lit au fil du temps, l'automatisation modifie elle aussi les contours de l'espace mental dans lequel prend place notre activité.

Une autre façon de faire avancer le débat consiste à continuer à développer les techniques permettant de visualiser et de quantifier l'activité cérébrale. L'imagerie cérébrale, et en particulier certaines méthodes d'analyses permettant de « décoder » l'activité du cerveau, offrent aujourd'hui de fascinantes possibilités d'explorer les relations entre traitement inconscient et conscience.

Ainsi, Vincent Taschereau-Dumouchel, de l'Institut international de recherche sur les télécommunications avancées, à Kyoto (Japon), et ses collègues ont montré en 2018 qu'il était possible d'amener des patients souffrant d'arachnophobie à réduire leur anxiété en leur demandant tout simplement de tenter de contrôler par la pensée la taille d'un cercle présenté sur un écran tandis que leur activité cérébrale était enregistrée. Ce que les sujets ignoraient, c'est que la taille du cercle était déterminée à chaque instant par un algorithme capable d'identifier en temps réel dans leur cerveau la présence d'une configuration d'activité neurale caractéristique des araignées... Autrement dit, par cette méthode de neuro-rétroaction élaborée, il est aujourd'hui possible de contrôler intentionnellement l'activation inconsciente de représentations arbitraires. De telles méthodes permettront sans doute de mieux cerner l'inconscient... mais aussi de mieux comprendre les mécanismes de la conscience elle-même. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Alamia et al., **Unconscious associative learning with conscious cues**, *Neuroscience of Consciousness*, pp. 1-10, 2016.

A. Cleeremans, **Connecting conscious and unconscious processing**, *Cognitive Science*, vol. 38(6), pp. 1286-1315, 2014.

S. Dehaene et al., **Conscious, preconscious, and subliminal processing : a testable taxonomy**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10(5), pp. 205-211, 2006.

L. Naccache, **Le Nouvel Inconscient**, Odile Jacob, 2006.

J. R. Searle, **La Redécouverte de l'esprit**, Gallimard, 1995.



L'ESSENTIEL

> Quand nous ouvrons les yeux le matin, nous devenons conscients de ce qui nous entoure. Les scientifiques cherchent à caractériser les processus cérébraux associés à cet état mental particulier.

> La neuro-imagerie révèle que dans le cerveau conscient, différentes aires de cet organe

entretiennent un dialogue à distance, à la fois dense et synchrone.

> La prise de conscience d'un stimulus s'accompagne aussi de certaines manifestations corporelles. Ces liens de la conscience avec le corps ou avec l'environnement restent à étudier.

L'AUTEUR



LIONEL NACCACHE
neurologue et chercheur
en neurosciences cognitives
à l'Institut du cerveau et
de la moelle épinière, à Paris

Observer la conscience

Comment le cerveau humain devient-il conscient d'une information visuelle, auditive ou autre ? Grâce notamment aux techniques d'imagerie cérébrale, les neurobiologistes comprennent mieux aujourd'hui ce qui caractérise la conscience et ses rouages.

L'une des questions fondamentales des neurosciences est de déterminer les relations entre le cerveau et la pensée. Le cerveau « produit-il » l'esprit, ou ce dernier est-il une propriété immatérielle de cet objet matériel branché sur le corps et sur le monde ? Certes, la définition de ce qu'est l'esprit reste en soi une recherche relevant de disciplines croisées. Mais il est clair que la conscience y prend une part importante. Or, ces dernières années, les progrès des neurosciences ont fait naître la possibilité d'observer la conscience dans le cerveau. Ou, plutôt, de repérer des caractéristiques neuronales propres à nos états conscients, qui permettraient de repérer ces derniers par la mesure expérimentale.

SE DOTER D'UNE DÉFINITION DE LA CONSCIENCE

Avant toute chose, il est indispensable de se doter d'une définition de la conscience qui nous permette de délimiter rigoureusement ce dont il sera question. Il est possible de définir la conscience comme notre capacité à nous

rapporter subjectivement nos propres états mentaux, à la manière de ce que nous affirmons quotidiennement : « Je vois ce visage ; j'entends cette voix ; je me souviens de ce coucher de soleil ; je suis en train de me brosser les dents... » Le néologisme « rapportabilité » offre une définition de la conscience dont la spécificité ne fait pas débat : l'immense majorité sinon la totalité des théoriciens de la conscience partagent l'idée que la conscience est nécessaire pour la rapportabilité.

Il est également important de noter que cette rapportabilité interne ne se limite pas à la communication verbale, mais qu'il est possible de la recueillir de manière non verbale chez des bébés, des patients aphasiques (incapables de parler), mais également chez d'autres espèces animales, par exemple chez le macaque. Il s'agit donc d'une capacité à accéder subjectivement à nos propres expériences, à nous les représenter d'une façon ou d'une autre.

Forts de cette définition, il devient possible de bâtir un programme scientifique afin de répondre à deux questions : premièrement, quelles sont les conditions cérébrales

> nécessaires et suffisantes à un état conscient, c'est-à-dire à la possibilité de se rapporter ses propres états mentaux, indépendamment de leur contenu? Deuxièmement, quel est le scénario cérébral de la prise de conscience, autrement dit la suite d'événements neuronaux qui aboutissent à la création d'un état conscient?

Être conscient requiert deux conditions absolument nécessaires. Tout d'abord, le cerveau doit être dans un mode d'éveil, c'est-à-dire que les vastes ensembles de neurones du cortex cérébral doivent être activés. Cette première condition repose sur un réseau de régions sous-corticales qui composent la formation réticulée et qui naissent dans le tronc cérébral (voir l'encadré ci-dessous).

Le tronc cérébral est la structure du système nerveux central située immédiatement au-dessus de la moelle épinière. La formation réticulée y naît, et se prolonge jusqu'au thalamus (un gros noyau gris qui appartient aux ganglions de la base) et jusqu'à d'autres noyaux voisins (tels que le noyau basal de Meynert). Comme le neurologue d'origine portugaise Antonio Damasio l'a très bien décrit en 2001, la formation réticulée reçoit en permanence des informations en provenance du monde extérieur et du corps. Dès qu'elle détecte une menace potentielle dans l'environnement ou un déséquilibre du «milieu intérieur», elle éveille le cortex situé au-dessus d'elle afin de solliciter des solutions stratégiques et élaborées pour assurer ce que l'on appelle, depuis le XIX^e siècle avec Claude Bernard, l'homéostasie – le maintien des fonctions physiologiques, comme le maintien de la glycémie ou de l'acidité des fluides internes autour de valeurs optimales.

IL NE SUFFIT PAS D'ÊTRE ÉVEILLÉ POUR ÊTRE CONSCIENT

Chaque fois que nous sommes conscients, nous sommes aussi éveillés: l'éveil est nécessaire à la conscience! Et les rêves, me direz-vous? Ne sont-ils pas d'authentiques expériences conscientes au cours desquelles nous nous rapportons ce que nous vivons? De sorte qu'une fois éveillés, nous parvenons à nous remémorer certains de ces épisodes qui nous semblent alors très bizarres... Ainsi, les rêves ne sont-ils pas des états de conscience sans éveil?

Non, car en réalité, la plupart des rêves surviennent lors d'un état très paradoxal, découvert dès les années 1950 par le neurobiologiste français Michel Jouvet: vu de l'extérieur, le dormeur n'a nullement l'air éveillé, mais son cerveau vient en fait d'être réactivé par sa formation réticulée. On parle de «sommeil paradoxal» (REM-sleep en anglais, ce qui signifie «sommeil à mouvements oculaires rapides»), qui correspond donc à un état

d'éveil cortical autorisant l'expérience consciente. Notons toutefois que certains rêves surviennent lors d'autres périodes du sommeil, et que leur mécanisme constitue un sujet de recherche très actif, exploré à la fois par les neuroscientifiques, mais également par des chercheurs en sciences humaines tels que le sociologue Bernard Lahire. Durant le sommeil lent profond, il semble que nous ne rêvions que lors de périodes instables caractérisées par des réveils partiels et transitoires du cortex, ce qui semble ainsi en accord avec ce premier principe: la conscience requiert un niveau d'éveil minimal.

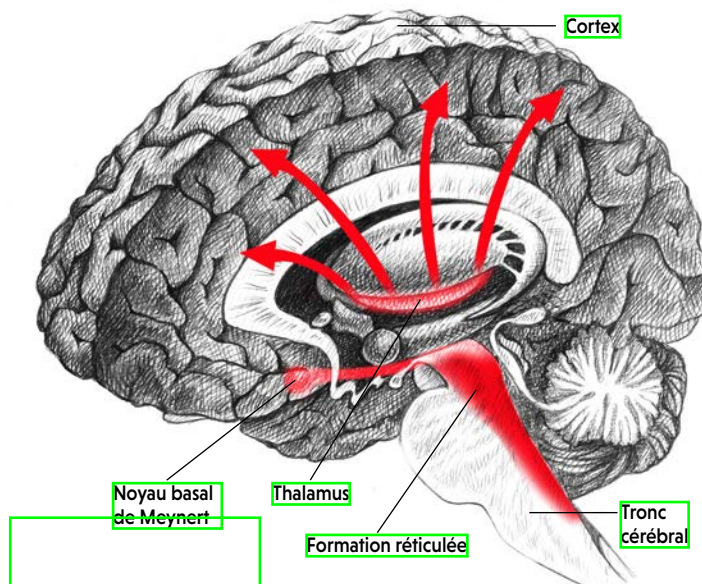
UNE « CONVERSATION NEURONALE » PARTICULIÈRE

Pour autant, être éveillé ne suffit pas. Lors de certaines crises d'épilepsie, un malade peut rester éveillé, garder ses yeux ouverts, se tenir debout avec un tonus postural d'éveil, voire même s'engager dans des activités motrices automatiques... mais il n'est conscient ni de lui-même ni de l'environnement. Autrement dit, il existe des états d'éveil sans conscience. Dans un registre plus dramatique, les états dits végétatifs illustrent la même dissociation: un éveil sans conscience de soi ni de l'environnement.

S'il ne suffit ainsi pas d'être éveillé pour être conscient, quel est l'indispensable

AU FOND DE NOTRE CERVEAU

Notre niveau de conscience est modulé par l'activité d'une structure nerveuse enfouie dans le tronc cérébral et nommée formation réticulée. Alimentée en permanence par des informations sensorielles (auditives, visuelles, tactiles...), elle module, avec le noyau basal de Meynert, l'activité de centres supérieurs tels que le thalamus ou le cortex, créant les conditions nécessaires pour que nous soyons conscients de nous-mêmes et de ce qui nous entoure.



CONSCIENCE : « FACILE » ET UN AUTRE « DIFFICILE »

La question de la conscience, objet de réflexions depuis l'Antiquité au moins, souffrait souvent de confusions, par exemple entre conscience perceptive, conscience de soi et conscience morale. Avec le développement de la psychologie expérimentale puis des neurosciences, dans les années 1980-1990, les notions sont devenues un peu plus précises.

La conscience est un état psychique où l'individu a une expérience subjective, où il « ressent » quelque chose, par exemple une couleur, un son, une odeur... La difficulté de définir la conscience avec précision est justement liée au caractère subjectif du « ressenti ». L'expérience subjective est en effet un phénomène mental propre au sujet et incommunicable en tant que tel à autrui : on devine ce que ressent autrui ou on en prend connaissance (partiellement) grâce à la communication verbale, mais on ne l'éprouve pas soi-même. De plus, qui dit conscience dit aussi esprit, et c'est alors toute l'énigme de la nature de l'esprit et de ses rapports avec la matière qui surgit.

En neurosciences, les chercheurs adoptent une définition opératoire de la conscience, qui se prête aux observations et aux expérimentations. Il en est ainsi de celle utilisée par Lionel Naccache dans son article ci-contre, où la conscience est vue comme « notre capacité à nous rapporter subjectivement nos propres états mentaux ». Une telle définition étant donnée, la démarche des neurosciences est ensuite d'explorer ce qui se passe physiquement dans le cerveau humain lorsque le sujet est conscient. En d'autres termes, les neuroscientifiques étudient les « corrélats neuronaux de la conscience », question que les philosophes nomment parfois le « problème facile de la conscience ».

C'est cette étude des corrélats neuronaux de la conscience qui a conduit à la théorie de l'« espace de travail neuronal global » développée par Stanislas Dehaene, Lionel Naccache et d'autres. Elle a aussi conduit à une autre théorie, plus ambitieuse mais aussi plus spéculative et plus minoritaire, dite de l'information intégrée, proposée en 2004 par Giulio Tononi, de l'université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis, et développée

notamment avec Christof Koch, de l'institut Allen de science du cerveau, également aux États-Unis.

Cette théorie prend comme point de départ la conscience et ses propriétés essentielles, et cherche à en déduire les propriétés causales que devrait vérifier son substrat physique. La théorie de l'information intégrée définit ainsi une quantité notée Φ , qui mesure l'« information intégrée » d'un système physique et qui traduirait son degré de conscience : plus la valeur de Φ est élevée, plus il y aurait conscience.

Selon Giulio Tononi et les tenants de sa théorie, celle-ci permet non seulement d'aider à déterminer si des patients qui semblent dans le coma sont conscients ou non, mais aussi à répondre à d'autres questions de nature plus fondamentale, comme savoir si un animal donné ou un robot, voire un objet plus simple, est doté d'une forme de conscience.

Cependant, ni la théorie de l'espace de travail neuronal global ni la théorie de l'information intégrée ne répondent à une interrogation essentielle qui constitue « le problème difficile de la conscience » : comment un système physique comme le cerveau humain engendre-t-il un phénomène mental (non physique) et subjectif tel qu'une perception consciente ? Pour la plupart des philosophes de l'esprit, il y a là un fossé explicatif et ils ne voient pas comment des modèles neurobiologiques, aussi complexes soient-ils, pourraient le combler. Certaines tentatives de résoudre la difficulté s'appuient sur une démarche de type matérialiste. Il en est ainsi des thèses du philosophe américain Daniel Dennett. Vivement critiquées par d'autres philosophes tels que les Américains John Searle ou Thomas Nagel, elles prétendent démystifier la question de la conscience et la débarrasser des « illusions » à son sujet, le « problème difficile » en faisant partie.

Pour Daniel Dennett, la conscience est un phénomène qui résulte du traitement de l'information effectué par le cerveau, un phénomène biophysique « au même titre que le métabolisme, la reproduction ou l'autoréparation ». Une autre approche, plus marginale, est celle du mathématicien et physicien britannique Roger Penrose, selon qui l'émergence de la conscience est due à des phénomènes quantiques se déroulant dans les microtubules des neurones cérébraux.

Pour l'Australien David Chalmers, la solution au problème difficile de la conscience passe par une forme de dualisme matière-esprit ou de panpsychisme : considérer que la conscience est une entité aussi fondamentale que le sont l'espace et le temps en physique, et qu'elle pourrait être universelle, présente un peu partout.

Malgré le renouveau des travaux scientifiques et des réflexions sur la conscience depuis les années 1980, il semble que le « problème difficile » soit encore bien loin d'une solution. Dommage, car il conditionne les réponses à nombre de questions d'ordre éthique ou existentiel : la crevette ou la poule que je m'apprête à manger a-t-elle souffert ? Pourquoi suis-« je » né dans ce corps plutôt que dans un autre ? À cette date plutôt qu'une autre ? Y a-t-il quelque chose après la mort ? Etc.

MAURICE MASHAAL
Pour la Science

- G. Tononi et C. Koch, **Consciousness : here, there and everywhere ?**, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, article 20140167, 2015.
- D. Chalmers, **L'Esprit conscient**, Ithaque, 2010.
- J. Kim, **Philosophie de l'esprit**, Ithaque, 2008.
- D. Dennett, **La Conscience expliquée**, Odile Jacob, 1993.



> ingrédient cérébral supplémentaire? Un cerveau conscient n'est pas simplement un cerveau éveillé; c'est également un cerveau qui est le siège d'une conversation neuronale très particulière opérant entre des régions distantes du cortex.

Cette structure de notre cerveau est, rappelons-le, constituée d'une mosaïque d'aires dévolues à des fonctions aussi différentes que la vision, le toucher, l'intégration d'informations sur notre environnement social, la perception des visages, l'audition, la planification de l'avenir, etc.

Lorsque nous sommes conscients, différentes aires du cortex, parfois distantes de plusieurs centimètres (une distance considérable à l'échelle des cellules de notre corps), conversent les unes avec les autres d'une façon bien particulière. Elles le font tout d'abord de façon cohérente, c'est-à-dire que l'activité des neurones est, dans ces différentes aires, en partie synchronisée; la communication est par ailleurs complexe, au sens où si l'on cherche à compresser les informations qu'elle véhicule à l'aide d'un logiciel de compression numérique, on conserve malgré tout une information qui reste riche et diverse; enfin, il s'agit d'une information différenciée, dont les caractéristiques diffèrent

Dans le cerveau conscient, des aires distantes ont de riches échanges d'information

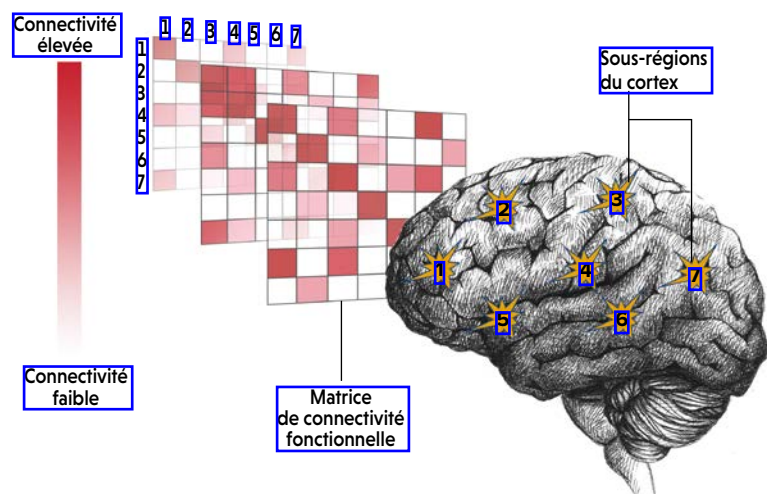
selon les aires corticales engagées dans cette conversation.

Dans certaines situations pathologiques, cette conversation devient excessive, appauvrie et indifférenciée; c'est typiquement ce qui survient lors d'une crise d'épilepsie accompagnée d'une perte de conscience. Autrement dit, pour être conscient, le cerveau doit se trouver dans un mode de communication suffisant, mais non excessif.

Récapitulons: pour être conscient, un cerveau doit être d'une part éveillé, et d'autre part le siège d'une activité spécifique, à la fois cohérente, complexe et différenciée selon les critères qui précèdent. Or il est aujourd'hui possible de détecter dans l'activité cérébrale la combinaison de ces deux conditions nécessaires et suffisantes à l'état conscient. À l'aide de l'IRM fonctionnelle ou de l'électroencéphalographie, nous parvenons à savoir si un cerveau est conscient, s'il est endormi et inconscient, ou encore s'il est éveillé mais inconscient.

UN ÉTAT DE FORTE CONNECTIVITÉ FONCTIONNELLE

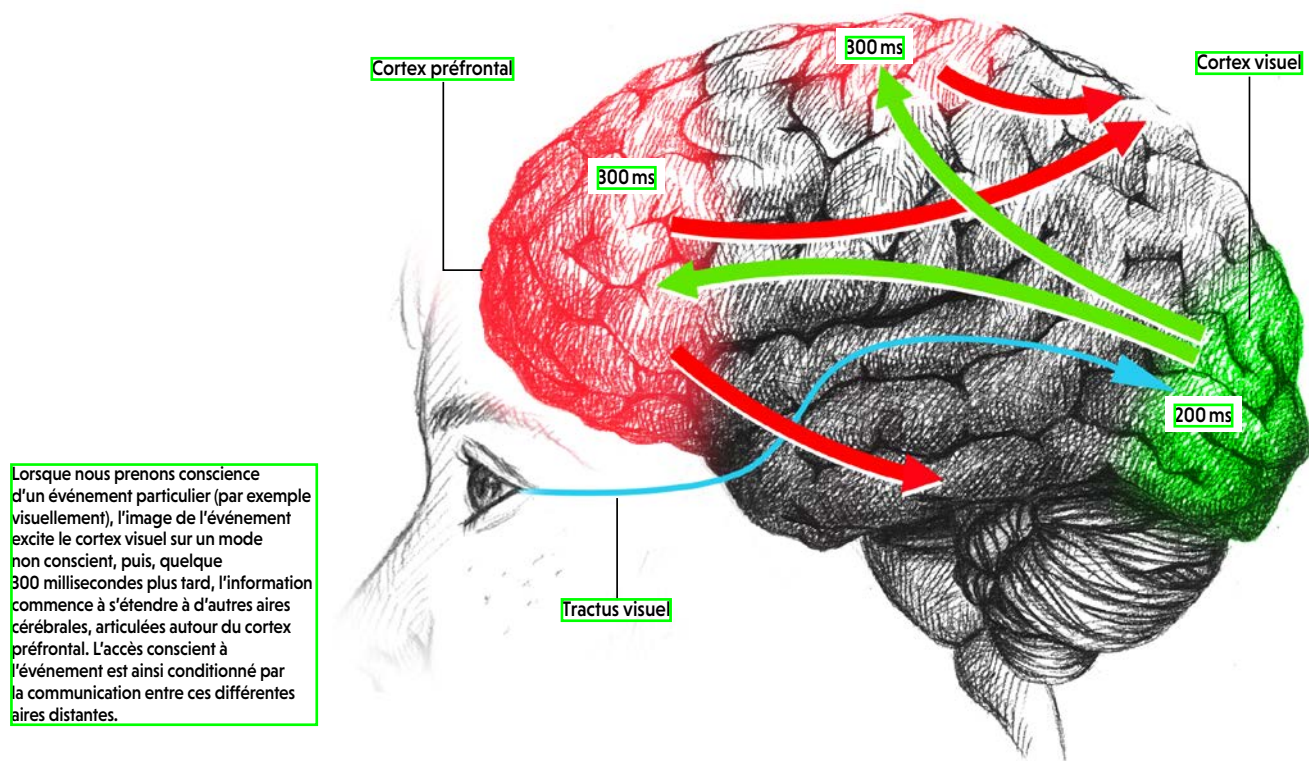
Les états conscients se repèrent par la richesse des communications à longue distance entre différentes sous-régions cérébrales (ici, on en a représenté sept, à seule fin d'illustration). À chaque instant, chaque sous-région du cortex est fonctionnellement connectée à certaines autres sous-régions (elles s'activent de manière analogue au même moment), ce que l'on représente dans un tableau appelé matrice: plus deux régions sont connectées, plus la case située à leur intersection dans le tableau tend vers le rouge. Un cerveau conscient se repère à des transitions rapides entre un très grand nombre de telles matrices, reflétant une connectivité fonctionnelle riche et changeante.



DES SIGNATURES CÉRÉBRALES IDENTIFIABLES

À titre d'exemple, une série de travaux réalisés dans les années 2000 conjointement dans mon laboratoire et celui de Stanislas Dehaene, au centre de neuro-imagerie de l'Inserm et du CEA, au sud de Paris, nous ont permis de caractériser ces signatures cérébrales de l'état conscient. Nous les utilisons auprès de malades plongés dans des états où il leur est impossible de communiquer (par exemple, des patients en syndrome *locked-in*, conscients mais paralysés, ou des sujets éveillés dont on ignore s'ils sont conscients ou non).

Pour identifier de telles signatures cérébrales de la conscience, l'une des pistes de recherche les plus prometteuses consiste à s'intéresser à la dynamique des configurations d'activité cérébrale. Voyons, encore une fois, le cortex sous la forme d'un ensemble de



sous-régions disposées à sa surface, telle une mosaïque. Notre hypothèse est que la signature de cet état conscient réside dans la nature précise des interactions qu'ont ces différentes sous-régions, ce qu'on appelle leur connectivité fonctionnelle.

Concrètement, si deux sous-régions ont tendance à s'activer simultanément, de façon concertée, on considère alors qu'elles sont fonctionnellement connectées. Décrire l'état conscient du cerveau à un instant donné revient alors à mesurer cette connexion fonctionnelle entre toutes les paires possibles de sous-régions cérébrales. Pour ce faire, on construit un tableau constitué d'autant de lignes et de colonnes qu'il y a de sous-régions prises en considération, et l'on reporte dans chaque case de ce tableau – ou matrice – un nombre d'autant plus élevé que la connexion entre les deux aires figurant dans la colonne et la ligne correspondante est intense (*voir l'encadré page ci-contre*).

DES TRANSITIONS D'UNE CONFIGURATION CÉRÉBRALE À UNE AUTRE

A chaque instant, l'état de connexion fonctionnelle du cerveau peut être représenté au moyen d'une telle matrice. Si l'on enregistre l'activité cérébrale à l'aide de l'IRM fonctionnelle pendant une vingtaine de minutes, il est possible d'estimer le nombre de matrices différentes qui semble décrire au mieux la dynamique cérébrale durant cette période.

Une série de travaux récents ont mis en évidence deux résultats originaux. Tout d'abord, le nombre de ces matrices semble plus élevé lorsque le sujet est conscient, par comparaison avec des états d'inconscience tels que le coma, l'état dit végétatif, l'anesthésie générale ou le sommeil profond. Deuxièmement, certaines de ces matrices semblent plus spécifiquement associées à l'état conscient. Lorsque nous sommes conscients, notre cerveau présente une combinaison complexe d'activations et d'inhibitions entre des régions corticales distantes, ce que l'on n'observe pas dans la plupart des états inconscients. Cette façon d'analyser le fonctionnement du cerveau permet véritablement d'isoler des signatures neuronales de l'état conscient, par opposition aux états non conscients.

Nos états conscients sont donc faits de transitions variées d'une configuration cérébrale à une autre (ou, plus précisément, d'une configuration de connexions fonctionnelles à une autre). Cela vaut indépendamment du contenu de notre conscience. Cet état de transition forme en quelque sorte la toile de fond de notre conscience. Sur cette toile de fond surgissent, à différents instants de notre vie, des prises de conscience particulières.

Imaginez-vous au volant de votre voiture traversant un paysage de collines verdoyantes. Votre attention, flottante, gère la conduite en mode semi-automatique, tandis que les notes d'un concerto de Tchaïkovski parviennent

> distraitement à votre oreille. Soudain, un panneau lumineux annonce un accident à un kilomètre et fait signe de ralentir. Sur la toile de fond de votre conscience surgit brusquement un événement ponctuel qui suscite cette fois une prise de conscience. Comment décrire ce qui se passe alors dans votre tête?

Afin de répondre à cette question générale, mes collègues et moi avons mené des expériences pour enregistrer l'activité cérébrale lorsque nous percevons un stimulus visuel ou auditif. Grâce à ces études, nous avons mis au jour un scénario en deux étapes.

Tout d'abord, toute perception commence par une étape non consciente (*voir la figure page précédente*). Au moment où le signal lumineux annonçant l'accident frappe votre rétine, les aires visuelles de votre cerveau commencent à s'activer avant même que vous en perceviez l'image consciemment, pendant environ 300 millièmes de seconde. Puis, au-delà de cette durée, la représentation inconsciente du signal commence à s'amplifier et à diffuser dans d'autres régions du cerveau.

L'ESPACE DE TRAVAIL GLOBAL, SUPPORT DE LA CONSCIENCE

Ces différentes aires qui diffusent l'information font partie de ce que l'on appelle l'espace de travail global conscient : selon la théorie proposée par le psychologue cognitiviste américain Bernard Baars, puis reprise et enrichie d'une version neuronale par Stanislas Dehaene, Jean-Pierre Changeux et moi-même, l'espace de travail global se compose d'un réseau d'aires organisées autour de la partie la plus antérieure de l'encéphale, le cortex préfrontal. Une fois prise en charge à ce niveau, la représentation devient consciente et l'on voit véritablement le signal. Puis l'activité neuronale peut alors atteindre des niveaux de représentation très complexes – notamment le sens des mots apparaissant sur le panneau d'alerte. En 2000, avec Stanislas Dehaene et Laurent Cohen, nous avons ainsi identifié une aire cérébrale qui reconnaît la forme visuelle des mots écrits, puis permet à l'espace global de travail d'en fournir un traitement conscient.

Grâce aux techniques telles que l'électroencéphalographie ou la magnéto-encéphalographie, il est possible de saisir la dynamique temporelle fine de la prise de conscience, à l'échelle de la milliseconde. Trois événements caractéristiques se produisent, qui permettent de repérer à coup sûr ce moment de prise de conscience.

L'un est une amplification soudaine et soutenue de la représentation initiale dans le réseau cérébral perceptif impliqué (par exemple les régions visuelles ou auditives).

Dans le même temps, intervient une modification très spécifique d'un paramètre appelé

puissance spectrale des neurones, qui décrit la contribution relative des principales ondes cérébrales (alpha, bêta, gamma, delta) au signal électrique d'ensemble du cerveau.

Enfin, on note une augmentation concomitante de la connectivité fonctionnelle entre la région perceptive impliquée et les régions qui composent l'espace de travail global (en particulier les cortex pariétaux et préfrontaux).

Ce scénario semble très général, et il faudra tester sa validité dans la prise de conscience de tous ces autres contenus plus difficiles à contrôler pour un expérimentateur : un souvenir, une émotion, une intention...

Ainsi, nous commençons à savoir décrire assez finement la dynamique complexe de l'activité cérébrale qui caractérise nos états conscients. Que le cerveau comporte des signatures physiologiques de la conscience, c'est un fait. Mais qu'il soit suffisant à produire l'intégralité de l'expérience consciente, voilà qui est beaucoup moins certain.

Mon équipe de recherche a récemment montré que lorsque nous prenons conscience d'un stimulus, non seulement notre cerveau présente les signatures décrites plus haut, mais nos pupilles se dilatent, notre cœur accélère. À l'École normale supérieure, l'équipe de Catherine Tallon-Baudry a récemment découvert que la façon dont notre cerveau sent et analyse les battements du cœur pourrait jouer un rôle dans notre conscience de soi. Alors, à quel point ces marqueurs somatiques (liés au corps) de notre vie mentale sont-ils nécessaires à notre vie consciente?

ÉLUCIDER LES RELATIONS ENTRE LE CERVEAU, LE CORPS ET L'ENVIRONNEMENT

De la même manière, la conscience, et notamment la richesse de ses contenus, requiert très probablement des interactions sociales très précoces, ainsi qu'une histoire individuelle, mais également intersubjective et culturelle. À la suite de l'anthropologue français François Flahault, il est absurde de penser le cerveau et la conscience comme isolés du monde environnant, et comme clivés des interactions avec ce monde qui leur permettent de se constituer. François Flahault voit là une sorte de nouveau dualisme fondé non pas sur une distinction radicale entre l'esprit et le corps, mais sur une distinction tout aussi radicale entre la conscience et le monde dans lequel le sujet se construit.

L'élucidation des relations entre le cerveau, le corps et l'environnement, notamment l'environnement humain et culturel, constitue l'une des grandes questions des sciences de la conscience. À n'en pas douter, cela devrait faire l'objet de travaux originaux et transdisciplinaires au cours des années à venir. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Demertzi et al., **Human consciousness is supported by dynamic complex patterns of brain signal coordination**, *Science Advances*, vol. 5, article eaat7603, 2019.

S. Dehaene et al., **What is consciousness, and could machines have it ?**, *Science*, vol. 358, pp. 486-492, 2017 (voir aussi *Science*, vol. 359, pp. 400-402, 2018 pour des réactions et réponses).

S. Dehaene, **Le Code de la conscience**, Odile Jacob, 2014.

L. Naccache, **Le Nouvel inconscient. Freud, Christophe Colomb des neurosciences**, Odile Jacob, 2006.

cité

sciences
et industrie

À l'occasion de la sortie de son numéro 500, le magazine *Pour la Science* convie le physicien philosophe Étienne Klein et ses invités à venir partager avec le public quelques éléments de réflexion autour des défis contemporains de la mécanique quantique.

Avec Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences; Bruce Benamran, créateur de la chaîne Youtube «e-penser»; Gérard Berry, informaticien, professeur au Collège de France et membre de l'Académie des sciences; Nathalie Besson, physicienne des particules, CEA.

Séance animée par Cécile Lestienne, directrice des rédactions de *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*.

Dessins en direct par Lison Bernet.

balade dans le monde de la physique quantique

table ronde

— jeudi 6 juin à 18h30



R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

DÉCOUPER UN TRIANGLE EN TRIANGLES

Est-il possible de découper un triangle en un nombre donné de morceaux triangulaires plus petits? Aujourd'hui encore, on découvre de nouveaux et remarquables résultats sur ce type de questions.

L'AUTEUR



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

Certains des résultats que nous allons présenter serviront aux enseignants pour animer leurs classes avec des problèmes amusants que l'on résout en réalisant de petits dessins; d'autres serviront à concevoir des exercices de programmation et montreront l'utilité des ordinateurs en mathématiques; d'autres encore illustreront que partout, même au sujet des plus élémentaires structures géométriques, se glissent de délicates questions qui exigent de longs raisonnements, et parfois restent non résolues.

L'ÉNIGME DU NOMBRE DE DÉCOUPAGES

Il existe 4 façons de découper un triangle en trois triangles plus petits (*triangles A₁ à A₄ dans l'encadré 1, page ci-contre*). Un seul de ces découpages (A₁) ne contient pas de triangles se regroupant en un triangle interne: on dira que c'est un découpage premier (par analogie avec les nombres premiers). Quand nous affirmons qu'il n'y a qu'un seul découpage premier d'un triangle en 3 triangles, nous voulons dire que tout autre découpage premier d'un triangle en 3 triangles se ramènera à celui-là par une transformation continue du plan qui préserve les segments de droites utilisés dans les dessins.

En langage plus simple, deux découpages seront considérés équivalents si, en ayant dessiné le premier sur une feuille de caoutchouc parfaitement élastique, on sait déformer la feuille en s'arrangeant pour que les segments

de droites des dessins restent droits à chaque instant, sans la déchirer ni la replier, et qu'on réussit à faire coïncider le premier découpage avec le second. On dit alors qu'il n'y a qu'un seul découpage premier du triangle en 3 triangles «à une déformation topologique continue près». Dans la suite, nous ne mentionnerons plus, en général, cette précision.

Autre résultat, qui demande plus de soin: il existe 23 découpages d'un triangle en 4 triangles, et 3 d'entre eux sont premiers. Amusez-vous à reconnaître les découpages premiers dans les figures de l'encadré 1 ou, mieux, essayez de retrouver vous-même les 23 découpages (de B₁ à B₂₃).

Une autre question se pose: les 23 découpages sont-ils tous vraiment différents au sens topologique? Pour s'en assurer voici une méthode. Pour chaque découpage, on considère les points de rencontre des segments intérieurs au triangle et on note leurs caractéristiques.

Pour le découpage B₁, par exemple, il n'y a qu'un seul point intérieur, et il correspond à la rencontre de 3 segments. On notera cela {3}.

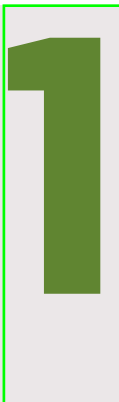
Pour le découpage B₂, on a 2 points intérieurs, le premier est la rencontre de 3 segments, tandis que le second est la rencontre d'une extrémité de segment avec un point intérieur à un segment. On notera {3, 1+1/2} cette caractéristique du découpage.

Le troisième découpage B₃ aura ainsi pour caractéristique {4}. Viennent ensuite {1+1/2, 1+1/2, 1+1/2} pour le triangle B₄, {} pour B₅ (il n'y a aucun point intérieur).

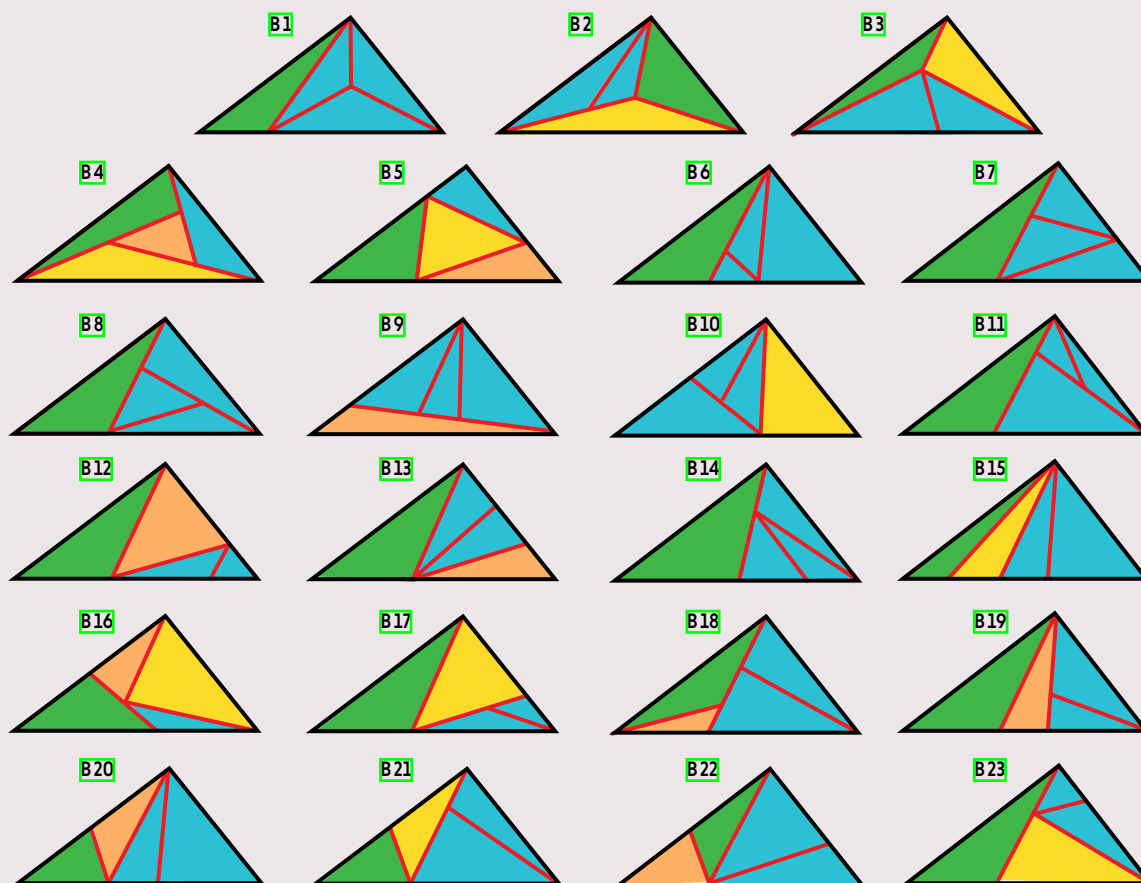
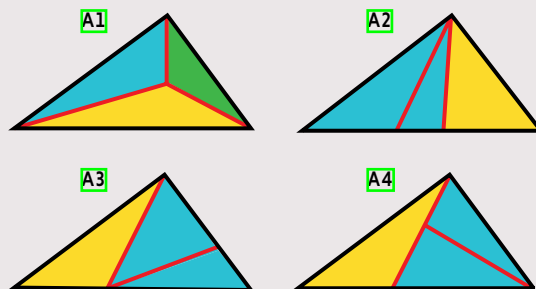


Jean-Paul Delahaye a notamment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

DÉCOUPER UN TRIANGLE EN 3 OU 4 TRIANGLES



Sont dessinées ici les diverses façons de découper un triangle en 3 triangles (schémas A1 à A4) ou en 4 triangles (schémas B1 à B23). Si l'on interdit à un regroupement de triangles d'en former un, il reste une seule façon (le découpage A1) de découper un triangle en 3, et trois de le découper en 4 (les découpages B4, B5, B16). Les segments tracés en rouge délimitent les triangles du découpage ; les regroupements de triangles formant eux-mêmes un triangle sont en bleu (découpages « non premiers »).



Pour l'ensemble des découpages en 4 triangles, on a la liste de caractéristiques suivante: B1: $\{3\}$; B2: $\{3, 1+1/2\}$; B3: $\{4\}$; B4: $\{1+1/2, 1+1/2, 1+1/2\}$; B5: $\{\}$; B6: $\{1+1/2\}$; B7: $\{1+1/2\}$; B8: $\{1+1/2, 1+1/2\}$; B9: $\{1+1/2, 1+1/2\}$; B10: $\{1+1/2\}$; B11: $\{1+1/2, 1+1/2\}$; B12: $\{\}$; B13: $\{\}$; B14: $\{2+1/2\}$; B15: $\{\}$; B16: $\{2+1/2\}$; B17: $\{1+1/2\}$; B18: $\{1+1/2, 1+1/2\}$; B19: $\{1+1/2\}$; B20: $\{\}$; B21: $\{1+1/2\}$; B22: $\{\}$; B23: $\{2+1/2\}$.

Les dessins dont les caractéristiques sont différentes ne peuvent pas être égaux à une déformation topologique continue près, car de telles déformations ne changent pas les caractéristiques notées entre accolades telles que nous les avons définies. Il reste quelques cas à

considérer de plus près, car:

- (A) les découpages B5, B12, B13, B15, B20, B22 sont tous du type $\{\}$;
- (B) les découpages B6, B7, B10, B17, B19, B21 sont tous du type $\{1+1/2\}$;
- (C) les découpages B8, B9, B11, B18 sont du type $\{1+1/2, 1+1/2\}$;
- (D) les découpages B14, B16 et B23 sont du type $\{2+1/2\}$.

Pour s'assurer que dans chacune de ces quatre catégories, il n'y a pas de découpages équivalents, on parcourt le périmètre de chaque triangle découpé en considérant successivement les trois sommets, puis les trois côtés, et l'on note le nombre de segments du

▷ découpage qui touchent l'élément en question en indiquant les regroupements. On sépare les trois nombres associés aux sommets des trois nombres associés aux côtés par un trait vertical. Si deux découpages sont identiques au sens topologique, alors ils auront les mêmes deux paquets de trois nombres (à l'ordre près des éléments dans chaque paquet). Pour le découpage B5, par exemple, on a [0, 0, 0 | 2, 2, 2].

Pour les découpages (A), de type {}, on a ainsi:

B5 [0, 0, 0 | 2, 2, 2], B12 [1, 0, 0 | 2, 1+2, 0], B13 [1, 0, 0 | 1+1, 3, 0], B15 [3, 0, 0 | 0, 1+1+1, 0], B20 [2, 0, 0 | 0, 1+2, 1], B22 [1, 0, 0 | 1, 3, 1].

Les crochets sont tous différents. On en déduit qu'il ne peut pas y avoir d'égalité entre les découpages de type {}.

Les découpages (B), de type {1+1/2}, donnent: B6 [2, 0, 0 | 0, 2+1, 0], B7 [1, 0, 0 | 2, 2, 0], B10 [2, 0, 0 | 0, 2, 1], B17 [1, 1, 0 | 1, 1, 0], B19 [2, 1, 0 | 0, 1+1, 0], B21 [1, 1, 0 | 0, 2, 1].

Les découpages (C), du type {1+1/2, 1+1/2}: B8 [1, 1, 0 | 0, 2, 0], B9 [2, 1, 0 | 0, 0, 1], B11 [2, 1, 0 | 0, 1, 0], B18 [1, 1, 1 | 0, 1, 0]. Les découpages B9 et B11 ayant les mêmes deux paquets de trois nombres, il faut les examiner plus attentivement. Ils diffèrent topologiquement, car les deux points intérieurs du découpage B9 sont sur un même segment, alors qu'ils sont sur deux segments différents dans le découpage B11.

Pour les découpages (D), de type {2+1/2}: B14 [1, 1, 0 | 0, 1+1, 0], B16 [1, 1, 0 | 0, 1, 1],

B23 [1, 1, 0 | 1, 1, 0]. Les découpages B16 et B23 sont bien différents: pour B16, jamais plus de deux extrémités des segments de découpage ne joignent un même côté du grand triangle, alors que pour B23, trois des extrémités de ces segments joignent le côté droit du triangle.

Ainsi, les dessins B1 à B23 de l'encadré 1 sont tous différents.

Que se passe-t-il pour les découpages en davantage de triangles? Aujourd'hui, on connaît 8 découpages premiers d'un triangle en 5 triangles, et 62 découpages premiers en 6 triangles. Mais on n'est certain ni que les listes connues soient complètes, ni qu'elles ne contiennent pas de découpages équivalents (voir www.mathpuzzle.com/triangle.html).

Un calcul de ces suites a été mené par Miroslav Vicher et a conduit au tableau suivant, qui attend confirmation (voir www.vicher.cz/puzzle/triangles/triangles.htm).

Nombre de triangles	Nombre de découpages	Nombre de découpages premiers
2	1	1
3	4	1
4	23	3
5	180	8
6	1806	62
7	20 198	535
8	227 120	4 213

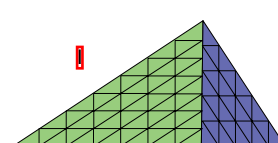
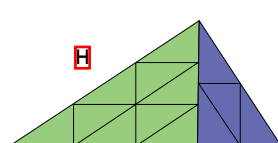
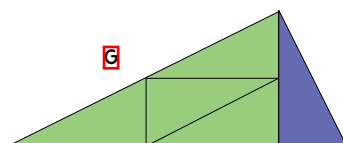
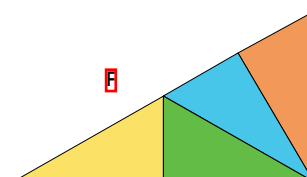
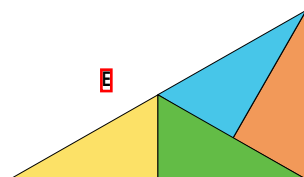
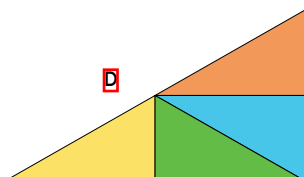
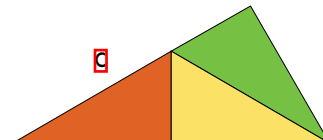
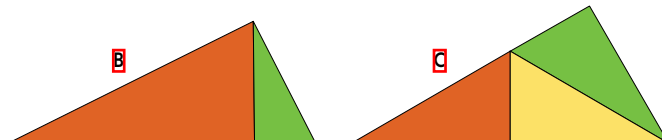
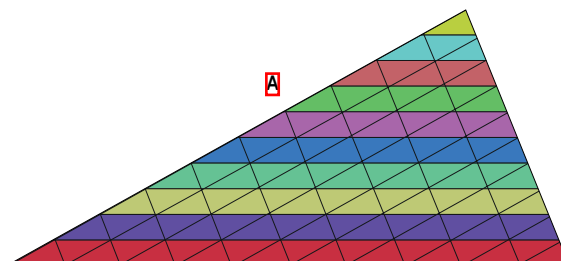
2

PAVER UN TRIANGLE

Tout triangle peut être pavé par n^2 triangles semblables à lui-même et égaux (A).

Le triangle rectangle d'angles 30°, 60° et 90° se découpe en deux triangles semblables à lui-même mais de tailles différentes (B), en trois triangles semblables à lui-même et de même taille (C), et en quatre triangles semblables à lui-même et de même taille (D, E, F).

Un triangle rectangle T de côtés n et m peut être pavé par $n^2 + m^2$ triangles semblables à lui-même. Le triangle G correspond à $5 = 1^2 + 2^2$, le triangle H à $13 = 3^2 + 2^2$ et le triangle I à $74 = 5^2 + 7^2$.



3

PAVER UN TRIANGLE PAR DES TRIANGLES IDENTIQUES

Un autre problème de découpage fait l'objet de questions imparfaitement résolues, malgré de récents progrès dus au mathématicien et logicien américain Michael Beeson qui, depuis une dizaine d'années, s'est passionné pour le sujet, redécouvrant parfois sans le savoir certains des résultats établis par d'autres mathématiciens, dont le Hongrois Miklós Laczkovich.

DÉCOUPAGE EN TRIANGLES SEMBLABLES

Michael Beeson a concentré son énergie sur le découpage de triangles en triangles semblables plus petits: ce sont des pavages d'un triangle par des triangles.

Le résultat le plus élémentaire sur ces questions s'appuie sur le pavage d'un triangle par un triangle n fois plus petit: chaque côté est n fois plus petit que le côté correspondant du triangle de départ. On découpe chaque côté en n segments de même longueur, et l'on trace à partir de ces points tous les segments de droites parallèles aux côtés qui s'en déduisent (voir la figure A de l'encadré 2).

L'observation de la figure est amusante, car elle permet de démontrer visuellement la formule $1+3+5+\dots+(2n-1)=n^2$: la somme des n premiers nombres impairs vaut n^2 . On raisonne sur la figure en cinq étapes:

- Les triangles situés à un même niveau (de la même couleur sur notre dessin) sont au nombre de 1, puis 3, puis 5, puis 7, etc.: à chaque étape, il s'en ajoute deux.
- Le nombre total de petits triangles est donc $1+3+5+\dots+(2n-1)$.
- L'aire de chaque petit triangle est n^2 fois inférieure à l'aire du triangle de départ, car l'aire varie comme le carré de la longueur et que les côtés des petits triangles sont exactement n fois inférieurs à ceux du grand.
- Puisqu'ils recouvrent exactement la surface du triangle de départ, leur nombre est n^2 .
- Conclusion: $1+3+5+\dots+(2n-1)=n^2$.

Ce que nous retiendrons ici est que tout triangle T peut être pavé par n^2 petits triangles identiques et semblables à lui-même, et cela quel que soit l'entier n . Autrement dit, un découpage d'un triangle en n^2 triangles de même taille et semblables à lui-même est possible pour tout triangle T et pour tout entier n .

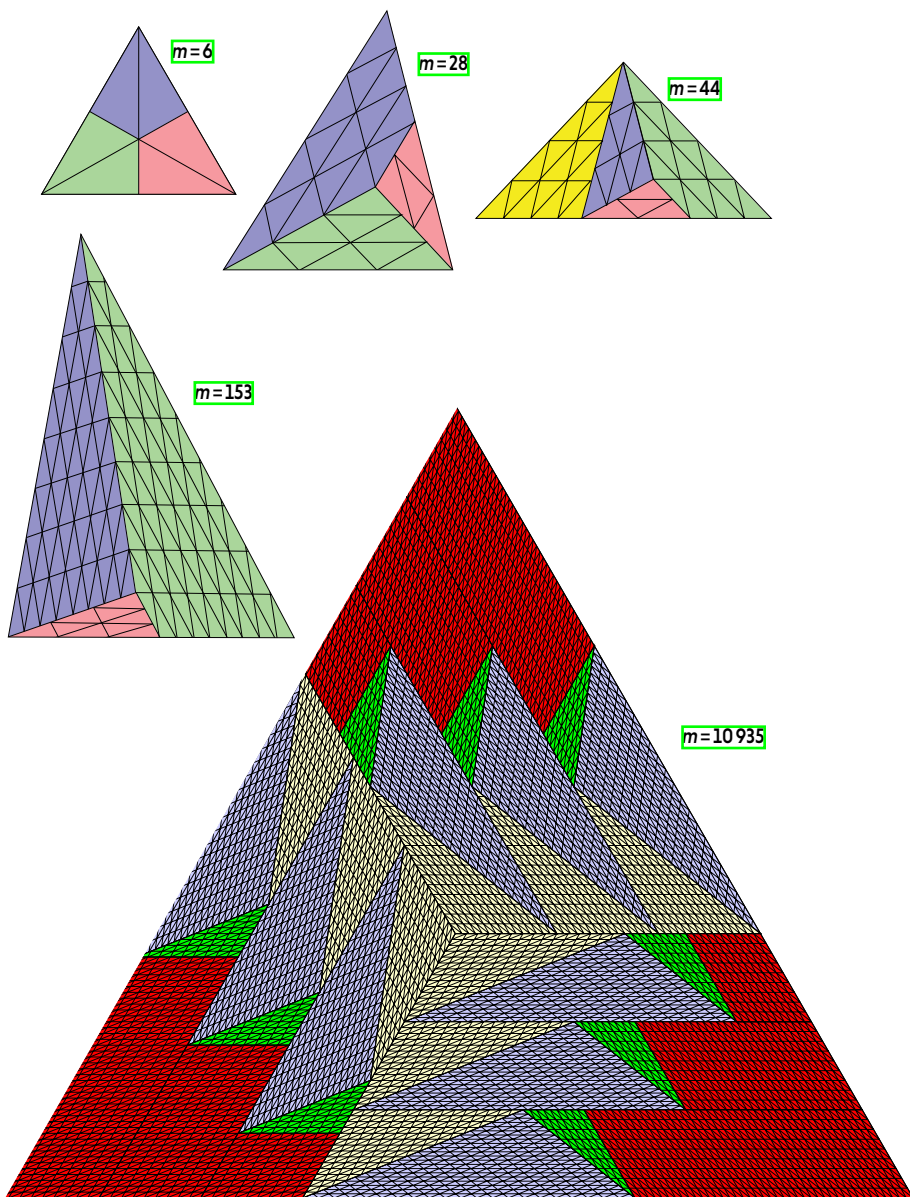
La question générale qui vient à l'esprit est alors: pour quels entiers m existe-t-il des triangles T pavables par m triangles semblables?

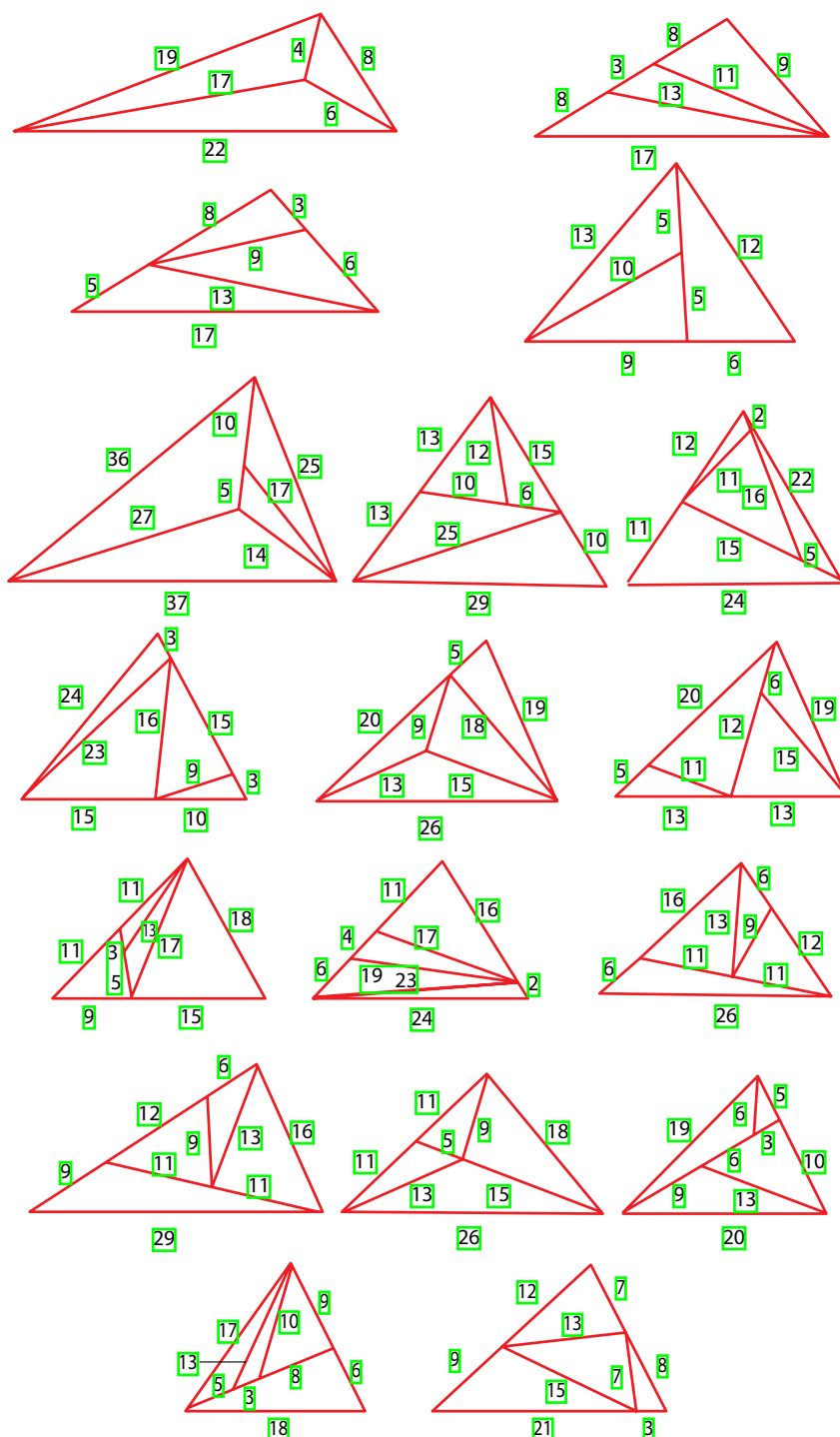
Trois variantes du problème sont possibles, selon qu'on exige ou non que les pavés aient la même taille, et qu'ils soient semblables au triangle de départ:

Problème A. Pour quels entiers m existe-t-il un triangle T pavable par m triangles semblables à T ?

La recherche des pavages d'un triangle par m triangles identiques conduit à d'étranges découvertes, comme ces pavages par $m = 6, 28, 44$ et 153 triangles. Certaines valeurs de m sont impossibles, comme 7 et 11 (c'est démontré). Pour $m = 14$, le problème est non résolu: on ignore à ce jour s'il existe un triangle pavable par 14 triangles identiques.

Les entiers m pour lesquels il existe un pavage du triangle équilatéral par m triangles identiques sont mal connus. Michael Beeson a démontré qu'aucun nombre premier supérieur à 3 ne convenait pour m . Il a aussi trouvé ce pavage extraordinaire du triangle équilatéral par $m = 10\,935$ triangles identiques de côtés 3, 5 et 7.





TRIANGLES ENTIERS

Les triangles dont les côtés ont des longueurs qui sont des nombres entiers sont nommés « triangles entiers ». On peut les découper eux-mêmes en triangles entiers. Chacun des 23 découpages topologiques d'un triangle en quatre (voir l'encadré 1) peut être réalisé avec des triangles entiers. En voici quelques-uns. Pour la liste complète, voir <http://mathworld.wolfram.com/TriangleDissection.html>.

Problème B. Pour quels entiers m existe-t-il un triangle T pavable par m triangles identiques et semblables à T ?

Problème C. Pour quels entiers m existe-t-il un triangle T pavable par m triangles identiques?

Le problème A est assez facile. Le B est assez difficile, mais résolu. Le C reste non résolu.

L'ARITHMÉTIQUE À LA RESCOURSE

Voici le joli petit raisonnement dû aux mathématiciens américains Stephen Snover, Charles Waiveris et John Williams qui permet de résoudre le problème A. On va répondre à la question en démontrant que pour tout entier positif m , il existe un triangle T pavable par m pavés semblables à T . Ici, on n'impose pas aux pavés d'être de même taille.

Donnons-nous un entier positif quelconque m . D'après le théorème des 4 carrés de Lagrange, conjecturé par Claude-Gaspard Bachet de Méziriac en 1621 et démontré en 1770 par Joseph-Louis Lagrange, tout entier positif m s'écrit comme somme de quatre carrés au plus. Il y a donc quatre cas : (1) $m = n^2$; (2) $m = n^2 + p^2$; (3) $m = n^2 + p^2 + r^2$; (4) $m = n^2 + p^2 + r^2 + s^2$.

Dans le cas (1), on utilise le découpage en n^2 triangles (figure A, encadré 2), qui est possible pour tout triangle T .

Dans le cas (2), on utilise le découpage classique du triangle rectangle en deux triangles rectangles semblables au triangle initial (figure B, encadré 2) par une hauteur, et on redécoupe chacun de ces deux triangles, l'un en n^2 triangles, l'autre en p^2 triangles (figure A, encadré 2). On peut aussi utiliser les découpages de type G, H, I de l'encadré 2.

Dans le cas (3), on utilise l'un des découpages de certains triangles en 3 triangles semblables (figure C), chacun des trois étant à son tour découpé en n^2 , p^2 , et r^2 triangles semblables au triangle de départ.

Dans le cas (4), on procède de la même façon à partir par exemple des découpages en quatre de l'encadré 2 (figures D, E, F).

DÉCOUPAGE POSSIBLE EN N^2 , $3N^2$ OU $N^2 + P^2$ TRIANGLES IDENTIQUES

Le problème B de savoir pour quels entiers m il existe des triangles T pavables par m triangles identiques et semblables à T est aujourd'hui complètement résolu par les mêmes chercheurs que ceux qui ont trouvé l'astuce du théorème de Lagrange. Voici leur solution.

- Pour chaque entier m de la forme n^2 (nombre carré), $3n^2$ (triple d'un carré) ou $n^2 + p^2$ (somme de deux carrés), il existe des triangles T qu'on peut découper en m triangles semblables à T et de même taille. Les entiers de l'une de ces trois formes sont les seuls possibles. Les séries sont :

4

n^2 : 0, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 289, 324, 361, 400, 441, 484, 529, 576, 625, 676, 729, 784, 841, 900, 961, 1024, 1089, 1156, 1225, ...

$3n^2$: 0, 3, 12, 27, 48, 75, 108, 147, 192, 243, 300, 363, 432, 507, 588, 675, 768, 867, 972, 1083, 1200, 1323, 1452, 1587, 1728, 1875, 2028, 2187, 2352, 2523, 2700, 2883, ...

$n^2 + p^2$: 2, 5, 8, 10, 13, 17, 18, 20, 25, 26, 29, 32, 34, 37, 40, 41, 45, 50, 52, 53, 58, 61, 65, 68, 72, 73, 74, 80, 82, 85, 89, 90, 97, 98, 100, 101, 104, 106, 109, 113, 116, ...

En les regroupant jusqu'à 100 (voir <https://oeis.org/A005792>): 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 25, 26, 27, 29, 32, 34, 36, 37, 40, 41, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 58, 61, 64, 65, 68, 72, 73, 74, 75, 80, 81, 82, 85, 89, 90, 97, 98, 100.

Le résultat pour $3n^2$ provient du découpage en n^2 de chacun des trois triangles de la figure C de l'encadré 2, découpage qui donne, comme on le souhaite, $3n^2$ triangles de même taille et semblables au grand triangle. Pour la série de nombres $n^2 + p^2$, il faut remarquer qu'un triangle rectangle T de côtés n et m peut être utilisé $n^2 + m^2$ fois pour composer un triangle rectangle semblable à T (voir les figures G, H, I de l'encadré 2).

Il faut bien noter que la partie positive du résultat est assez facile (on examine et on contrôle les constructions proposées), mais que ce n'est pas du tout le cas pour la partie négative (consistant à montrer qu'il n'existe aucun autre nombre pour lequel on puisse faire le pavage recherché), qui est sensiblement plus délicate.

POSSIBILITÉS ET IMPOSSIBILITÉS INATTENDUES

Le troisième problème (C) se révèle d'une incroyable difficulté, malgré quelques progrès récents. Rappelons qu'on se demande pour quelles valeurs de m il existe un triangle T pavable par m triangles T' identiques (on n'impose pas ici que T' soit semblable à T).

Ce qui est fascinant dans ce problème, c'est qu'on découvre aujourd'hui encore des pavages que personne n'avait repérés auparavant (voir l'encadré 3). Ainsi, le découpage en 6 est possible maintenant. Plus surprenant, le découpage en 28 est possible. Michael Beeson l'a découvert en utilisant un programme qui devait l'aider à démontrer que 28 n'était pas possible! Le découpage en 44 est aussi possible. Le découpage en $153 = 3^2 + 12^2$ était possible avant (comme somme de deux carrés), mais un pavage inattendu est apparu!

Deux résultats remarquables ont aussi été démontrés. Le premier indique que les valeurs $m=7$ et $m=11$ sont impossibles: aucun triangle ne peut être pavé par 7 ou 11 triangles identiques! N'est-il pas fascinant qu'une propriété générale aussi simple du triangle n'ait pas été

découverte ou même soupçonnée jusqu'à récemment? La plus simple des questions non résolues est la suivante. Existe-t-il des triangles pavables par 14 triangles identiques?

L'autre découverte récente de Michael Beeson est que le pavage du triangle équilatéral est impossible pour tout nombre premier au-delà de 3. On connaît aujourd'hui très mal l'ensemble des valeurs m pour lesquelles le pavage en triangles identiques du triangle équilatéral est possible.

TRIANGLES À CÔTÉS ENTIERS

Les triangles à côtés entiers – nous dirons «triangles entiers» – sont particulièrement élégants et sont à l'origine d'amusantes questions associant géométrie et arithmétique. Notons d'abord qu'il résulte de l'inégalité triangulaire (la longueur d'un côté d'un triangle est toujours inférieure à la somme des longueurs des deux autres) que tout triplet d'entiers positifs (a, b, c) tel que chaque somme de deux des trois entiers est inférieure au troisième détermine un triangle dont les côtés ont comme longueurs (a, b, c) .

La question du dénombrement de ces triangles entiers n'est pas simple. Le résultat proposé en 2000 par Tom Jenkins et Eric Mullers est le suivant: pour un périmètre donné n , le nombre de triangles entiers est l'entier le plus proche de $n^2/48$ si n est pair, et l'entier le plus proche de $(n+3)^2/48$ si n est impair.

Quand on découpe un triangle entier, peut-on le faire de façon à n'avoir que des sous-triangles entiers? Oui, c'est possible. L'encadré 4 donne notamment quatre exemples correspondant aux quatre découpages topologiquement différents d'un triangle en trois (les quatre dessins du haut). Pour chacune des 23 catégories de découpages d'un triangle en quatre de l'encadré 1, on peut trouver un découpage d'un triangle entier en triangles entiers qui en respecte le schéma. L'encadré 4 en donne quelques-uns (pour les autres, voir <http://mathworld.wolfram.com/TriangleDissection.html>).

Pour terminer, voici trois énoncés simples à propos des triangles entiers:

- Le seul triangle entier dont les longueurs des côtés et l'aire sont des entiers consécutifs est le triangle (3, 4, 5), dont l'aire est 6. Rappelons à ce sujet que l'aire A d'un triangle dont les côtés sont a, b, c est donnée par la formule de Héron:

$$A = (1/4)[(a+b+c)(a+b-c)(a-b+c)(-a+b+c)]^{1/2}.$$

- Le seul triangle entier ayant des entiers consécutifs pour ses côtés et l'une de ses hauteurs est le triangle (13, 14, 15) dont la hauteur à partir du côté 14 vaut 12.

- Les seuls triangles entiers dont l'aire est égale au périmètre sont ceux qui ont pour côtés (5, 12, 13), (6, 8, 10), (6, 25, 29), (7, 15, 20) et (9, 10, 17). ■

BIBLIOGRAPHIE

Article **Integer triangle** de Wikipedia, consulté en mars 2019.

Ed Pegg Jr., **Triangles** sur www.mathpuzzle.com/triangle.html, consulté en mars 2019.

M. Beeson, **No triangle can be cut into seven congruent triangles**, 2019 (<http://arxiv.org/abs/1811.09723v4>).

T. Jenkyns et E. Muller, **Triangular triples from ceilings to floors**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 107, pp. 634-639, 2000.

A. Soifer, **How Does One Cut a Triangle?**, Springer, 2009.

M. Laczkovich, **Tilings of triangles**, *Discrete Mathematics*, vol. 140, pp. 79-94, 1995.

S. L. Snover et al., **Rep-tiling for triangles**, *Discrete Mathematics*, vol. 91, pp. 193-200, 1991.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DU NOIR PRESQUE PARFAIT

Pour qu'un objet apparaisse complètement noir, il ne suffit pas que le matériau dont il est fait absorbe la lumière. Sa surface doit aussi être structurée à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

Comment obtenir du noir vraiment noir ? La question agite le milieu des arts depuis bien longtemps. Mais elle a connu récemment de multiples rebondissements à travers la querelle entre les artistes britanniques Stuart Semple et Anish Kapoor, lequel détient les droits exclusifs sur le Vantablack, substance artificielle réputée la plus sombre au monde. Cette question du noir profond concerne aussi les physiciens, qui cherchent à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques ou à absorber les lumières parasites dans les télescopes. Or des progrès décisifs ont été réalisés ces dernières décennies – grâce à des revêtements structurés à des échelles spatiales de plus en plus petites.

Les noirs que nous rencontrons ne sont jamais totalement noirs : nous voyons les plis d'une chemise noire, la

forme des touches noires de nos claviers, etc., tout simplement parce que ces surfaces réfléchissent encore une partie de la lumière ambiante. Un objet parfaitement noir, que les physiciens appellent « corps noir », absorberait toute lumière qui lui parvient. Sa luminosité serait alors si faible qu'aucun détail n'en serait discernable : il serait impossible d'en distinguer la forme ou le volume.

ENTRE RÉFLEXION ET ABSORPTION

Pour qu'un corps s'approche de cet idéal, il faut donc qu'il réfléchisse le moins possible de lumière et, en même temps, qu'il absorbe la lumière afin d'être bien opaque.

Comment faire ? Les premiers noirs ont été réalisés à partir de pigments à base de charbon, de fumée – des composés à haute teneur en carbone – ou de graphite, dont sont faites les mines de

crayon. On comprend mieux aujourd'hui l'opacité de ces matériaux. Il y a une dizaine d'années, on a pu calculer l'absorption d'une couche de graphène, c'est-à-dire une couche cristalline d'épaisseur monoatomique constituée d'atomes de carbone liés en un réseau hexagonal (voir l'encadré page 90).

Le résultat, bien vérifié expérimentalement, est remarquable : cette couche de minceur extrême ne transmet que 97,7% de la lumière incidente, quelle que soit sa longueur d'onde. Cette valeur, entièrement déterminée par des constantes fondamentales, signifie aussi que le graphène absorbe 2,3% de la lumière.

Le graphite étant un matériau formé d'un empilement de plans de graphène

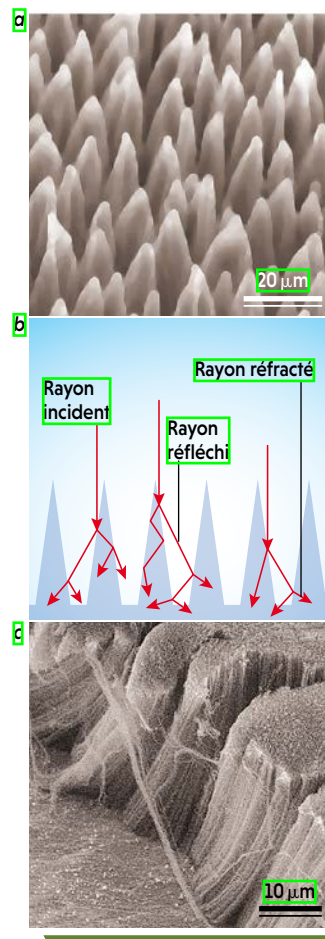


STRUCTURER LA SURFACE POUR ÉLIMINER LES RÉFLEXIONS

Diverses techniques permettent de structurer une surface à l'échelle micrométrique, voire nanométrique. On peut de cette façon réduire considérablement le pouvoir réfléchissant de la surface. Par exemple, une surface de silicium texturée en minuscules cônes au moyen d'impulsions laser (a) a un pouvoir réfléchissant de l'ordre de 1 %, alors que pour une surface lisse, ce pouvoir réfléchissant est d'environ 30 %. Cette réduction des reflets est due aux multiples réflexions et réfractions subies par les rayons lumineux incidents, qui sont in fine presque complètement absorbés dans le matériau (b). Le même principe est à l'œuvre avec le Vantablack, revêtement formé d'une couche de nanotubes de carbone orientés perpendiculairement à la surface (c).



Un objet revêtu de Vantablack apparaît complètement noir et donc sans relief (*buste du milieu*). Il existe aussi des peintures très noires, mais moins performantes : en réfléchissant une partie de la lumière, elles laissent apparaître le relief des objets (*buste de droite*).



séparés de 0,336 nanomètre, on peut évaluer la transmission d'une épaisseur de graphite en faisant le produit des transmissions des couches de graphène qui le composent. On estime ainsi que l'absorption est de 90 % pour 100 couches de graphène, soit 34 nanomètres d'épaisseur, et de 99,9 % pour 300 couches, soit 100 nanomètres. Cet ordre de grandeur explique pourquoi, sur une feuille blanche, un trait de crayon à papier, épais de seulement quelques dizaines de nanomètres, apparaît noir.

Par son absorption importante, le carbone semble donc un bon candidat pour faire du noir. Pourtant, la surface d'un morceau d'anthracite, la variété de charbon ayant la plus haute teneur en

carbone (95 %), est, bien que noire, très brillante ! Elle réfléchit la lumière ambiante et l'on sait, depuis Augustin Fresnel, que cette réflexion est inévitable à l'interface de l'air et d'un matériau massif et homogène. En fait, le coefficient de réflexion augmente avec l'indice optique du milieu et aussi avec... son pouvoir d'absorption.

La situation est donc paradoxale : plus le coefficient d'absorption du matériau est élevé, plus le coefficient de réflexion est grand ! Un exemple nous est donné par la comparaison du diamant et du graphite, tous deux composés uniquement de carbone, et dont les indices optiques sont voisins. Une surface de diamant (transparent) renvoie 17 % d'un faisceau de lumière jaune arrivant en incidence

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



normale. Pour le graphite (absorbant), une surface taillée parallèlement aux plans de graphène renvoie 33% de la lumière incidente. En outre, pour que la réflexion soit faible, il faut que l'indice optique du matériau soit proche de celui de l'air, ce qui signifie qu'il doit être très peu dense...

Puisque les conditions de l'opacité (matériau dense et absorbant) sont aussi celles qui favorisent la réflexion, la situation semble insoluble. Il y a toutefois une solution : texturer la surface afin que l'interface ne soit pas plane. Un procédé élémentaire est de réduire le graphite en poudre la plus fine possible. Le résultat est beaucoup plus noir que le matériau massif. Pourquoi ? Parce qu'avant de repartir vers l'observateur, la lumière subit de multiples réflexions à l'intérieur des anfractuosités de la surface. Mais on ne contrôle pas grand-chose, notamment l'agencement et la forme des agrégats dont la poudre est constituée.

DES SURFACES STRUCTURÉES

On peut faire beaucoup mieux avec les techniques récentes de lithographie ou de nanotechnologie. Au moyen d'impulsions laser, il est ainsi possible de texturer une surface lisse de silicium de façon à y creuser une forêt de pics microscopiques de forme conique. Cela réduit considérablement le pouvoir réfléchissant initial de la surface de silicium, qui est d'environ 30%.

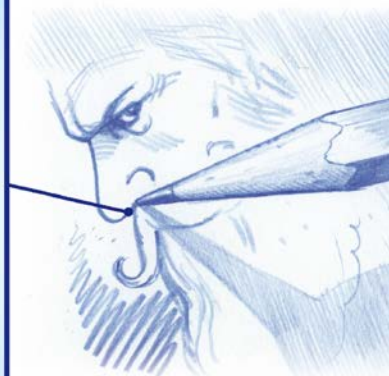
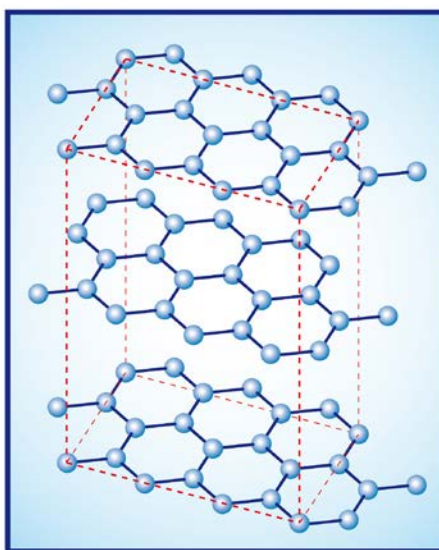
Et si l'on structure une surface à une échelle plus petite que la longueur d'onde lumineuse, l'effet est de réduire la densité de la matière et tout se passe comme si l'on réduisait l'indice optique. Celui-ci est alors une moyenne entre l'indice de l'air et l'indice du matériau massif. Plus la porosité sera élevée, plus l'indice effectif diminuera et se rapprochera de celui de l'air, et donc moins la réflexion sera importante.

La texturation « ultime » est atteinte par le Vantablack (acronyme de *Vertically aligned nanotube array black*) du fabricant britannique Surrey NanoSystems. Il s'agit d'un revêtement d'environ 20 à 30 micromètres d'épaisseur et constitué de nanotubes de carbone d'une vingtaine de nanomètres de diamètre, orientés perpendiculairement à la surface. La densité de ces nanotubes est très faible : ils occuperaient seulement une fraction de 1% du volume du revêtement, ce qui assure un indice optique très proche de l'air.

Les performances sont stupéfiantes. Une surface ainsi revêtue absorbe 99,965% de la lumière visible : le noir obtenu est tel

LA MAGIE DU CRAYON NOIR

Les mines de crayon noir sont en graphite, une forme de carbone constituée de feuillets parallèles de graphène espacés d'environ 0,4 nanomètre. Chaque plan de graphène est formé d'atomes de carbone chimiquement liés entre eux en un réseau hexagonal. Un feuillet de graphène a un pouvoir d'absorption optique relativement élevé : il absorbe 2,3 % de l'intensité lumineuse incidente. Avec quelques dizaines de couches de graphène, un trait de crayon sur du papier blanc apparaît alors noir : le pouvoir d'absorption atteint 50 % au bout de 30 couches seulement, et 90 % au bout de 100 couches.



qu'aucun reflet ne vient aider l'œil à discerner détails ou reliefs. Un objet tridimensionnel recouvert de Vantablack semble ainsi bidimensionnel... au grand plaisir des admirateurs des œuvres d'Anish Kapoor, qui en a l'usage artistique exclusif. Les utilisations professionnelles ne s'arrêtent pas là : déflecteurs, absorbeurs de lumières parasites ou de la lumière solaire, cavités à corps noir...

Mais le Vantablack n'est pas si facile à appliquer, car il faut faire croître les nanotubes à partir de la surface originale. Cela nécessite une technologie de dépôt chimique en phase vapeur ou, sous une forme un peu moins performante (99,8% d'absorption), un processus de pulvérisation exclusif suivi d'un post-traitement.

Cela explique aussi pourquoi la recherche du noir vraiment noir n'est pas achevée. Grâce à un financement participatif, Stuart Semple a ainsi commercialisé une peinture acrylique, le Black 3.0, dont l'absorption dans le visible est comprise entre 98% et 99%. C'est moins bien que le Vantablack, mais mieux que toutes les autres peintures noires applicables au pinceau. Seule condition pour l'acheter : ne pas être Anish Kapoor ou l'un de ses affiliés, c'est expressément écrit ! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Lehman et al., **Carbon nanotube-based black coatings**, *Applied Physics Reviews*, vol. 5, article 011103, 2018.

Z.-P. Yang et al., **Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array**, *Nano Letters*, vol. 8(2), pp. 446-451, 2008.

Site de financement participatif du Black 3.0 : <https://bit.ly/2Pyf3QM>

Site de Surrey NanoSystems sur le Vantablack : www.surreynanosystems.com/fr/vantablack

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 499 (mai 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493



N° 492 (oct. 18)
réf. PL492



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488

A retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. x 9,90 € = €
2^e réf. x 9,90 € = €
3^e réf. x 9,90 € = €
4^e réf. x 9,90 € = €
5^e réf. x 9,90 € = €
6^e réf. x 9,90 € = €

TOTAL À RÉGLER €

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom :
Prénom :
Adresse :

Code postal Ville :
Telephone
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
N°
Date d'expiration
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)
Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris



DU POT AU LAIT À LA MUCOVISCIDOSE

Aujourd'hui, la mucoviscidose est particulièrement fréquente dans les populations européennes. À l'âge du Bronze, des Européens ont commencé à se nourrir de produits laitiers. Ces deux histoires seraient intimement liées...

La mucoviscidose est la maladie héréditaire potentiellement létale la plus commune en Europe: elle y touche un nouveau-né sur 2 000 à 3 000 selon l'Organisation mondiale de la santé. C'est aussi une maladie particulièrement fréquente dans les populations d'origine européenne. Ainsi, à Hawaï, elle concerne 1 individu d'origine européenne sur 3 800, contre 1 individu autochtone ou oriental sur 90 000. Et en Angleterre, l'incidence de la maladie est bien plus faible dans les populations asiatiques (1 individu sur 12 000) que dans celles d'origine européenne (1/2 500), et serait plus rare encore dans les populations africaines et orientales. Pourquoi cette maladie est-elle si répandue dans les populations européennes? Une équipe internationale vient d'apporter la réponse à cette énigme en explorant leurs origines préhistoriques.

«Mucoviscidose» signifie maladie des mucus visqueux. En anglais, on l'appelle fibrose kystique (*cystic fibrosis*) du pancréas. En fait, de nombreux organes sont touchés: poumon, tube digestif, pancréas... C'est le résultat d'un dysfonctionnement du transport des ions à travers les membranes cellulaires, qui, en perturbant le métabolisme de l'eau, entraîne une augmentation fatale de la viscosité des mucus des voies respiratoires et digestives.

Il s'agit d'une maladie monogénique, c'est-à-dire due à une mutation d'un seul gène. Le gène muté est récessif: il ne donne lieu à la maladie que si les deux exemplaires du gène (l'un provenant du père, l'autre de la mère) sont mutés. Si l'un seulement des exemplaires est muté, ou si aucun ne l'est, l'individu n'est pas malade. En 1985, une équipe canadienne a déterminé que le gène muté est localisé sur le chromosome 7, puis, quatre ans plus tard, l'a isolé. Ce gène code une



Cette jeune femme de la culture campaniforme vivait en Allemagne environ 2 500 ans avant notre ère. Elle mesurait environ 1,60 mètre et avait une quinzaine d'années quand elle est morte, sans doute d'une blessure à la tête.

La culture campaniforme doit son nom aux poteries en cloche inversée qu'elle utilisait notamment pour le lait, telle celle-ci, trouvée en Allemagne.

Nombre de peuples campaniformes enterraient leurs morts en position fœtale dans des tombes individuelles, parfois accompagnés de poteries.

EN CHIFFRES

1 900

On connaît aujourd'hui plus de 1 900 mutations de la protéine CFTR responsables de la mucoviscidose.

4 %

Deux parents porteurs sains d'une mutation du gène impliqué dans la mucoviscidose, c'est-à-dire n'ayant qu'un exemplaire muté du gène, ont 25 % de risque d'avoir un enfant atteint de mucoviscidose et 50 % d'avoir un enfant porteur sain. La maladie touchant un nouveau-né sur 2 000 à 3 000 en Europe, on estime que 4 % des Européens sont des porteurs sains.

2 millions

En France, environ 5 000 personnes souffrent de la mucoviscidose et on estime que 2 millions de personnes sont porteuses saines d'une mutation responsable de la maladie. On observe des variations régionales considérables, avec 1 naissance concernée sur 2 000 en Bretagne, contre 1 sur 10 000 à Paris et dans le sud de la France.



délétion), et le codon correspondant sur le gène. Ainsi, la population européenne présente une double originalité: une proportion de cas anormalement élevée pour une maladie héréditaire sévère, et une fréquence anormalement élevée d'une mutation responsable de la maladie. Les généticiens ont bien sûr cherché des explications et, après avoir passé en revue toutes les hypothèses possibles, n'en ont retenu qu'une: cette mutation a été sélectionnée positivement au cours de la pré-histoire en Europe.

Or on connaissait déjà un cas de maladie héréditaire récessive sélectionnée positivement: la drépanocytose ou anémie falciforme, conséquence d'une mutation du gène de l'hémoglobine β . Comme la mucoviscidose, cette maladie est monogénique et touche des populations bien localisées – à 80 % en Afrique subsaharienne. Elle est par ailleurs hautement létale. Dès les années 1950, les généticiens s'étaient rendu compte que cette mutation sélectionnée positivement touchait les populations vivant dans des régions où sévit le paludisme, une maladie dont l'agent, *Plasmodium falciparum*, se développe dans le globule rouge, la cellule qui, justement, contient l'hémoglobine. On avait alors découvert que le parasite se développait mal au sein d'un globule rouge garni d'une hémoglobine mutée.

Or le gène est porté par un chromosome non sexuel, présent en deux

grosse protéine de 1 480 acides aminés (les constituants des protéines) nichée dans la membrane des cellules, où elle sert de canal pour les ions chlorure (Cl^-), d'où son nom CFTR (*cystic fibrosis transmembrane conductance regulator*).

UNE MUTATION SÉLECTIONNÉE?

Les généticiens ont alors fait une constatation étonnante: une mutation, aujourd'hui nommée p.Phe508del, est de loin la plus fréquente parmi les personnes atteintes de mucoviscidose (voir l'encadré page 94). Cette mutation supprime le 508^e acide aminé (une phénylalanine) de la protéine normale. Il manque donc un acide aminé à la protéine (on parle de

exemplaires dans le génome après la fécondation. Trois cas sont alors possibles chez un individu : soit ses deux exemplaires sont normaux, soit ils sont tous deux mutés, soit l'un est normal et l'autre muté. Dans le premier cas, l'individu est sain, mais sensible au paludisme ; dans le deuxième, l'individu est protégé du paludisme, mais présente une maladie létale ; dans le troisième, l'individu ne présente pas la maladie, mais est protégé contre le paludisme, car la moitié de son hémoglobine est mutée. Ce dernier cas représente donc un avantage sélectif pour son porteur, nommé avantage hétérozygote, par rapport aux deux autres cas (dits homozygotes). Ce qui explique que le gène muté soit sélectionné malgré la lourde charge héréditaire.

UN AVANTAGE CONTRE LA DIARRHÉE SÉCRÉTOIRE

Evidemment, par comparaison, les généticiens ont pensé qu'un avantage hétérozygote devait aussi intervenir dans le cas de la mucoviscidose. Mais lequel ? Aucun indice évident n'apparaissait. Il a fallu la convergence d'idées et de résultats provenant de l'archéologie et de la génétique pour confirmer une hypothèse émise il y a une trentaine d'années et reprise en 2010 par José Peña, de l'université du Pays basque, à Bilbao, et ses collègues : la mutation protège des diarrhées sécrétoires telles que celle provoquée par la toxine du choléra.

En effet, cette toxine entraîne une augmentation du flux sortant d'ions chlorure par les canaux CFTR des cellules de l'épithélium intestinal, c'est-à-dire exactement l'inverse de ce que la mutation p.Phe508del induit. Ainsi, chez l'individu hétérozygote, qui porte un seul exemplaire muté du gène CFTR et dont 50% des canaux sont donc mutés, la déshydratation due à la diarrhée est moins importante, et la personne résiste mieux à la contamination bactérienne.

Une manière de confirmer cette hypothèse était de prouver qu'elle explique la localisation géographique de la population concernée. C'est ce qu'a fait une équipe internationale coordonnée par Emmanuelle Génin, de l'université de Brest, et Philip Farrell, de l'université du Wisconsin à Madison. L'équipe vient de réévaluer les âges des plus récents ancêtres portant la mutation p.Phe508del dans différentes populations de l'Europe. Cet âge varie fortement suivant un axe nord-ouest/sud-est. En Irlande, cet ancêtre date de 2708 avant notre ère et en Grèce, de 842 avant notre ère. Ainsi, la

UNE MUTATION PLUS FRÉQUENTE QUE LES AUTRES

Chez les Européens atteints de mucoviscidose, la mutation p.Phe508del est de loin la plus fréquente (voir ci-dessous). Elle est par ailleurs souvent associée à une mutation du gène de la lactase, qui permet à cette enzyme de digérer le lactose, le sucre du lait, chez l'adulte, et à une grande diversité de gènes codant des antigènes HLA. Situées à la surface des cellules, ces molécules constituent une sorte de signature de l'individu qui aide le système immunitaire à le distinguer d'agents pathogènes. Plus elles sont nombreuses et plus ses ancêtres ont été confrontés à des attaques d'agents pathogènes. Finalement, ces Européens présentent trois caractéristiques que l'on attend chez les descendants d'une population qui élevait du bétail pour se nourrir de produits lactés.

Mutation	Fréquence relative	Effet
p.Phe508del	66%	Bloque la maturation de la protéine CFTR
p.Gly542X	2,4%	Synthèse réduite ou absente de la protéine CFTR
p.Gly551Asp	1,6%	Empêche la régulation du canal CFTR
c.3909C>G	1,3%	Bloque la maturation de la protéine CFTR
p.Trp1282X	1,2%	Synthèse réduite ou absente de la protéine CFTR
p.Arg553X	0,7%	Synthèse réduite ou absente de la protéine CFTR

mutation est apparue au début de l'âge du Bronze en Europe de l'Ouest et du Nord (France et Danemark : 2583 avant notre ère), puis a été introduite par migration en Europe de l'Est et du Sud (République tchèque : 1183 avant notre ère ; Albanie : 717 avant notre ère).

Or ces dates coïncident avec l'expansion de la culture campaniforme, caractérisée par des poteries en forme de cloche et d'autres objets comme des flèches à ailerons et des boutons en os perforés, dont le scénario a aussi été précisé récemment. En analysant le génome d'Européens trouvés dans des tombes datant de l'âge du Cuivre et de l'âge de Bronze, et dont la moitié étaient associés à des objets de la culture campaniforme, un collectif international a montré que les populations liées à cette culture s'étaient bien répandues en Europe, et non juste leurs objets. Et il s'avère que leur expansion coïncide temporellement et géographiquement avec celle de la mutation p.Phe508del.

Les individus qui portaient la culture campaniforme élevaient du bétail pour se nourrir de produits laitiers. Mais des bactéries responsables de diarrhées sécrétoires pouvaient contaminer le lait si l'hygiène n'était pas convenable. Ainsi, cet élevage aurait changé les paramètres de la sélection naturelle, fournissant un avantage aux porteurs sains de la mutation, à la différence des populations du Pacifique, par exemple, qui ne consommaient pas de lait. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Farrell et al., **Estimating the age of p. (Phe508del) with family studies of geographically distinct European populations and the early spread of cystic fibrosis**, *Eur. J. Hum. Genet.*, vol. 26, pp. 1832-1839, 2018.

I. Olalde et al., **The Beaker phenomenon and the genomic transformation of northwest Europe**, *Nature*, vol. 555, pp. 190-196, 2018.

M. A. Alfonso-Sánchez et al., **An evolutionary approach to the high frequency of the Delta F508 CFTR mutation in European populations**, *Medical Hypotheses*, vol. 74, pp. 989-992, 2010.

P. Brice et al., **Genetic screening for cystic fibrosis : An overview of the science and the economics**, *J. Cyst. Fibros.*, vol. 6 (4), pp. 255-261, 2007.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€ 29 % de réduction *	79€ Au lieu de 114,40€ 31 % de réduction *	99€ Au lieu de 174,40€ 43 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

A renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG19STD



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

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement:

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°:

Date d'expiration: Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB):

Signature obligatoire:

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)



**FORMULE
DÉCOUVERTE**
• 12 n° du magazine papier

59€
Au lieu de 82,80€
D1A39E



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

79€
Au lieu de 114,40€
P1A79E



**FORMULE
INTÉGRALE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€
Au lieu de 174,40€
I1A99E

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

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

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

DES ALIMENTS PLUS OU MOINS MI-CUITS

En jouant avec la coagulation des protéines ou la dégradation des pectines, on obtient des degrés de cuisson différents au sein d'un même aliment.

Les «œufs parfaits», que j'ai inventés il y a une vingtaine d'années, sont intermédiaires entre l'œuf cru et l'œuf dur: en chauffant à 65°C, on obtient la coagulation d'une seule des protéines du blanc, ce qui conduit à une consistance blanche, légèrement opaque et encore tremblotante; le jaune, lui, reste cru. Puis, en augmentant de quelques degrés, on a un blanc plus blanc, plus opaque et plus pris, puisqu'une autre protéine a coagulé, et ainsi de suite, presque de degré en degré. Le procédé s'applique évidemment aux viandes et aux poissons, qui sont également des mélanges de diverses protéines ayant des températures de dénaturation, donc de coagulation, différentes.

Toutefois, nous pouvons jouer avec d'autres dimensions que la température. Nous pouvons agir sur l'acidité, puisque la charge électrique et, donc, l'état de repliement des protéines dépendent de ce paramètre. Une autre dimension? L'oxydation, puisque la formation des liaisons chimiques responsables de la coagulation est une réaction d'oxydation des groupes sulfhydryles ($-SH$), qui engendre des «ponts disulfures».

Bien sûr, le temps opère aussi: plus on cuit longtemps les œufs, plus ils sont fermes, au point que des œufs durs cuits plus de vingt minutes deviennent caoutchouteux, en plus d'avoir un cerne vert autour du jaune, et la dégradation des protéines engendre ce gaz nauséabond qu'est l'hydrogène sulfuré.

Et si l'on cuisait différemment, selon les endroits, pour obtenir des œufs «spatialement mi-cuits»? En pratique, on immergera à mi-hauteur des œufs dans

Dans un rôti de bœuf, le chauffage périphérique entraîne une cuisson radialement différenciée. On peut généraliser le principe.



une casserole, bien calés afin qu'ils ne roulent pas, et on portera l'eau à ébullition assez longtemps pour coaguler la moitié inférieure. On obtient ainsi un demi-œuf presque cru dans un demi-œuf dur, un peu comme un de ces œufs mimosa où l'on farcit un demi-œuf dur. Attention: l'écalage de la partie supérieure est délicat.

UNE MI-CUISSON MODULÉE DANS L'ESPACE

Puisque la cuisson des viandes et poissons relève aussi de la transformation des protéines, pouvons-nous imaginer des mi-cuissons spatiales de viande ou de poisson? Classiquement, c'est ce qui se passe pour les filets de poisson cuits à l'unilatérale, c'est-à-dire laissés sur une même face pendant toute la cuisson. Et c'est ce que l'on obtient quand on cuit un rôti de bœuf pas trop longtemps: on a un gradient radial de cuisson, que le cuisinier maîtrise.

Les légumes et les fruits? Là, le problème est un peu différent. Ces aliments ne cuisent pas par coagulation des protéines, mais par dégradation des molécules de pectines, qui, avec les molécules de cellulose et d'hémicellulose, cimentent les cellules de leurs tissus. La dégradation du ciment intercellulaire permet aux cellules de se séparer, d'où l'amollissement. La

réaction est lente, parce qu'il s'agit de dégrader les pectines maillon par maillon. Aussi, quand on mi-cuit spatialement des carottes, on pourrait craindre qu'au cours du chauffage prolongé, le transfert de chaleur entraîne la cuisson de la totalité de la carotte... Il n'en est rien: l'expérience montre que la faible conductivité thermique des tissus de la carotte limite la propagation de la chaleur et permet de conserver une bonne mi-cuisson spatiale.

Lançons un défi: quels autres paramètres reste-t-il à explorer pour obtenir ces variations spatiales de cuisson? ■



LA RECETTE ŒUFS SPATIALEMENT MI-CUITS

- 1 Poser des œufs dans une casserole.
- 2 Les coincer avec des fourchettes, afin qu'ils ne puissent pas rouler.
- 3 Marquer la partie supérieure d'une croix au stylo (en vue de l'écalage).
- 4 Mettre de l'eau jusqu'à mi-hauteur.
- 5 Cuire pendant 10 minutes, à petite ébullition.
- 6 Écaler en prenant garde à conserver la partie cuite en dessous.
- 7 Poser chaque œuf sur une soucoupe, partie cuite en bas; assaisonner et servir avec des mouillettes de fromage de comté et des mouillettes de pain grillé.

L'Observatoire de Paris propose deux Diplômes d'Université.

LUMIÈRES SUR L'UNIVERS

Formation en ligne en astrophysique - Niveau (L1-M1) - Diplômante

- Cours et nombreux exercices interactifs - **Tutorat personnel individualisé** assuré par des **astrophysiciens professionnels**.
- Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs, étudiants...
- Validation possible sous forme d'un Diplôme d'Université ou de Crédits de Licence ou de Master (ECTS)

Des parcours spécialisés adaptés à tous

Des étoiles aux planètes : **niveau L1-L2**

Cosmologie et Astrophysique extragalactique : **niveau L2**

Mécanique Céleste : **niveau L3**

Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : **niveau L3**

Sciences Planétaires : **niveau L3**

Fenêtres Sur l'Univers : **niveau M1**

Instrumentation, chaîne de mesure et projets : **niveau M1**

Inscriptions 2019 - 2020 ouvertes jusqu'au 7 Septembre 2019 :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Contenus visibles ici : <https://media4.obspm.fr/portail/>

contact.dulu@obspm.fr



EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

Formation en présentiel ou à distance en vidéo, Diplômante

Objectifs

Acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Contenu

Cours le mardi soir de 17h à 20h à Paris : Mécanique Céleste, Ondes et instruments, Histoire, Soleil, Planétologie comparée, Traitement de données, Etoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie.

Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option ; nombre de places limitées).

Un stage d'observation de 4 nuits est proposé à l'Observatoire de Haute Provence en été (en option réservé en présentiel ; nombre de places limitées).



Publics concernés

Cette formation s'adresse à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 7 septembre sur le site d'inscription en ligne :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/>

contact.duecu@obspm.fr - Tél. : 01.45.07.78.87

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.88

VANTABLACK

Ce revêtement d'environ 20 à 30 micromètres d'épaisseur est constitué de nanotubes de carbone. En absorbant 99,965 % de la lumière incidente, il est d'un noir presque absolu.

P.38

20 QUBITS

Dans le domaine des ordinateurs quantiques, des annonces tapageuses font état de dispositifs à 70 qubits (versions quantiques des bits des ordinateurs classiques). Mais si l'on ne prend en compte que les qubits utiles pour les calculs, les systèmes actuels n'en intègrent qu'une vingtaine.

P.46

« La nouvelle idylle entre biologie du développement et évolution est certainement l'événement majeur de ces dernières décennies en biologie évolutive »

HERVÉ LE GUYADER
Professeur émérite à Sorbonne Université, à Paris

P.7

28 %

C'est la proportion d'espèces menacées d'extinction en Europe et en Asie centrale, d'après une étude mondiale sur la biodiversité.

P.66

AMORÇAGE

Ce terme désigne une technique bien connue en psychologie expérimentale. Elle est fondée sur le fait que la réponse d'un sujet à un stimulus quelconque est facilitée par la présentation préalable de ce même stimulus ou d'un autre stimulus qui lui est associé.

P.20

BIOANONYMAT

Il existe dans le commerce des kits de bioanonymat qui contiennent un pulvérisateur d'un mélange d'ADN de diverses provenances. Cette technique permettrait de brouiller les empreintes génétiques et ainsi de dissimuler son identité.

P.92

CFTR

On connaît aujourd'hui plus de 1900 mutations de la protéine CFTR responsables de la mucoviscidose, une maladie fréquente surtout dans les populations européennes, où elle touche un nouveau-né sur 2 000 à 3 000.

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#6
En vente en
librairie et
Relay



196 pages
12,50 €

Entrez dans les coulisses de la recherche



www.carnetsdescience-larevue.fr

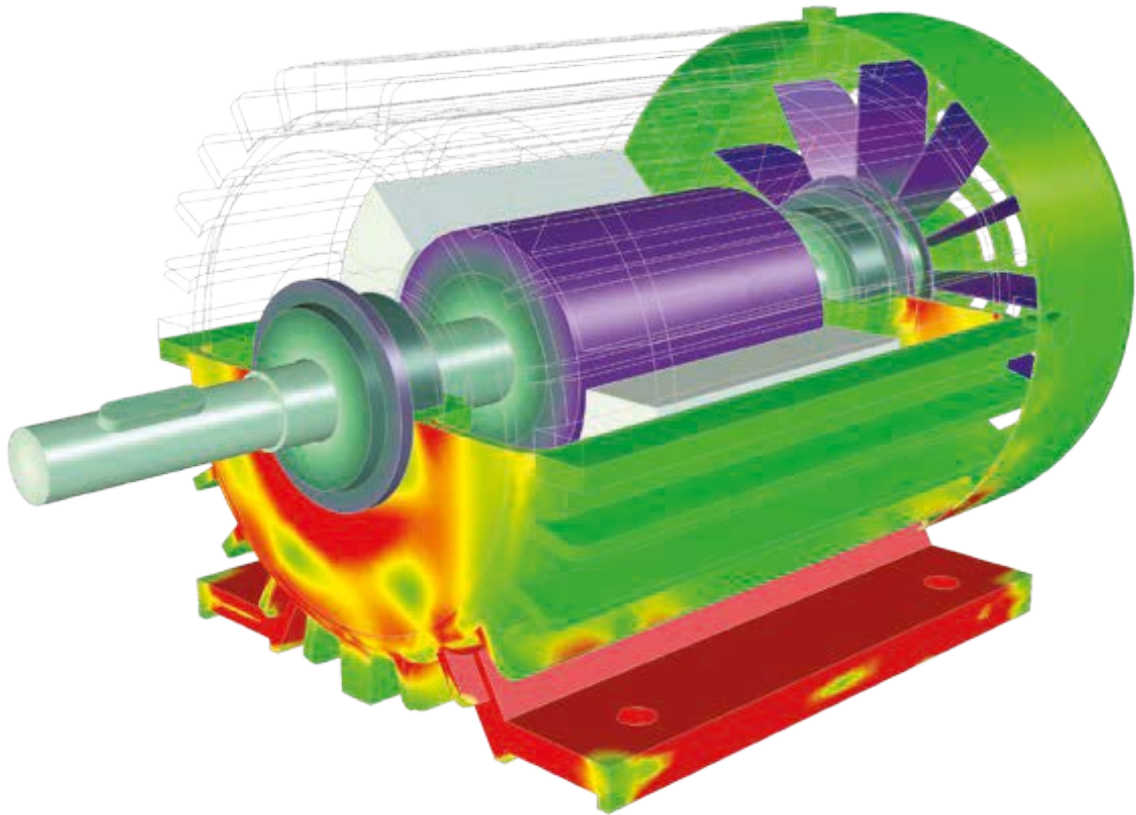
Retrouvez-nous sur



et sur www.cnrseditions.fr



Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor