PALÉONTOLOGIE
Les oiseaux, des dinosaures aberrants

MATHÉMATIQUES
Fermat : prouver mieux avec moins

BIOLOGIE
Échanges cellulaires : des myriades de canaux

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

Mai 2017 - n° 475

www.pourlascience.fr

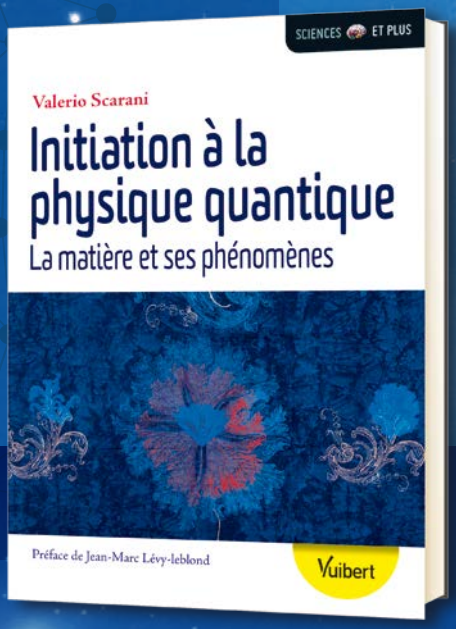
TROUS NOIRS INTRIQUÉS

Une porte vers l'espace-temps quantique

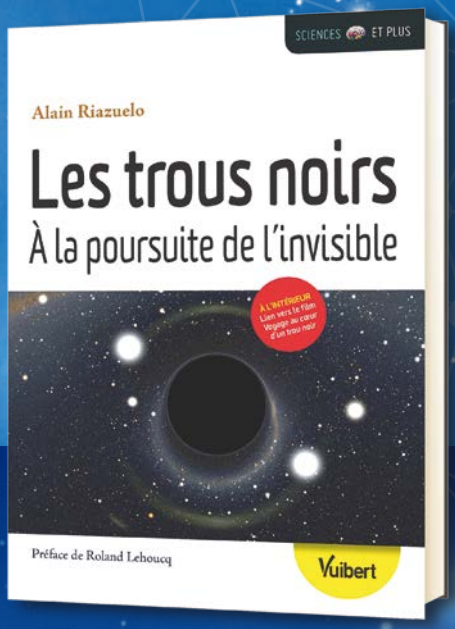
M 02687 - 475 - F: 6,50 € - RD

BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ESP : 7,2 € - Gr : 7,2 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF - PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,6 TND

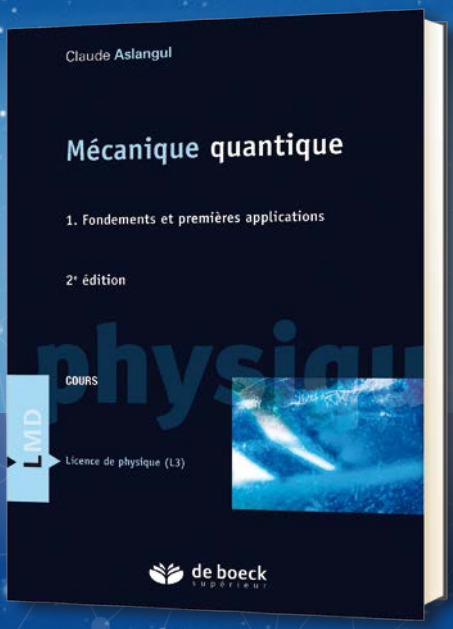
Découvrez la physique quantique



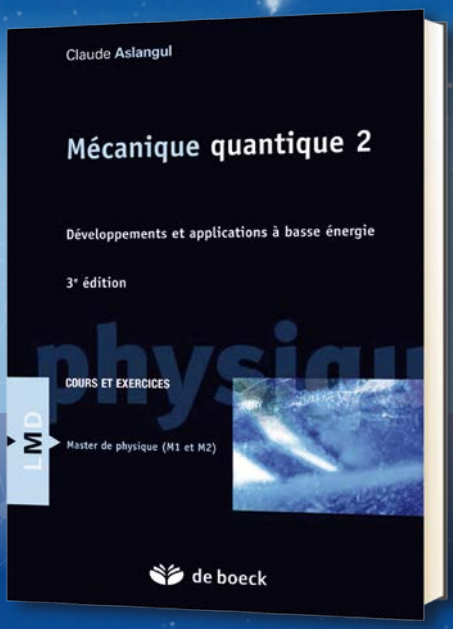
192 p. • 1ère éd. 2016 • **14,90€**
ISBN : 9782311403060



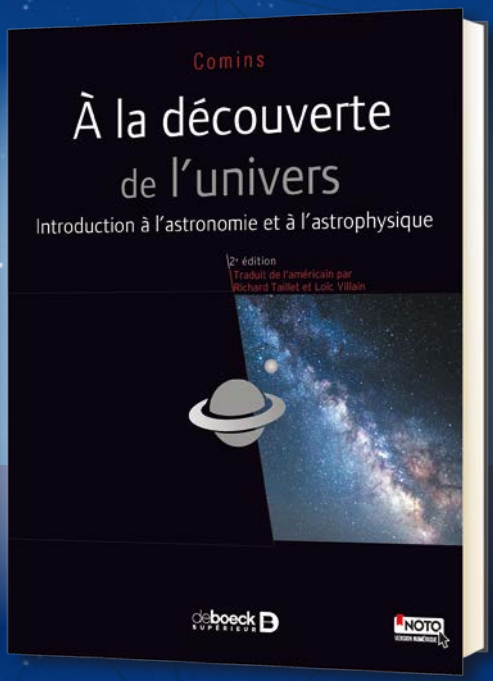
208 p. • 1ère éd. 2016 • **17,90€**
ISBN : 9782311403145



744 p. • 2e éd. 2016 • **39,00€**
ISBN : 9782807302952



1040 p. • 3e éd. 2015 • **39,00€**
ISBN : 9782804191153



536 p. • 2e éd. 2016 • **49,90€**
ISBN : 9782807302945

En librairie ou sur www.deboecksuperieur.com

deboeck SUPÉRIEUR

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
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay, Arthur Peys
assisté de William Armand
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry
et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Didier Aurelle, Maud Bruguière, Eric Buffetaut, Gwendoline Fox, Aline Gerstner, Évelyne Host-Platret, Laurence Henry, Cédric Hubas, Capucine Jahan, Stefan Lalonde, Christophe Pichon, Pierre Sans-Jofre, Daniel Tacquenet, Loïc Villain

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr – Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience1fr – Tél. 01 55 42 84 28

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 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

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
http://boutique.pourlascience.fr/

DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tél. 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. President : Keith McAllister. 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.**
Siège social : 170 bis boulevard du Montparnasse 75014 Paris.
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 %
Certification : PEFC
« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :
P_{tot} 0,007 kg/tonne

ACPM OJD

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Ruée sur l'espace-temps

Qu'est-ce que l'espace ? Qu'est-ce que le temps ? Jusqu'au début du XXe siècle, les physiciens voyaient l'espace et le temps comme un cadre vide et totalement passif au sein duquel se déroulent les phénomènes : une sorte de réceptacle inerte où le réel se manifeste et qui se décrit à l'aide de quatre dimensions, trois pour l'espace et une pour le temps.

Même la relativité restreinte d'Einstein, théorie publiée en 1905, n'a pas modifié fondamentalement cette conception. Elle a certes montré que les relations entre coordonnées spatiales et temporelles sont plus complexes que celles de la physique galiléenne, au point qu'il était pertinent d'introduire le terme d'espace-temps, mais on restait sur l'idée d'un cadre vide et passif.

Un aperçu sur son intimité quantique ?

La véritable révolution est venue en 1915 avec la théorie de la relativité générale. L'espace-temps y obtenait le statut d'acteur physique à part entière : la déformation de la géométrie de l'espace-temps traduit ce que nous appelons la gravitation, déformation qui dépend elle-même de la matière et de l'énergie présentes.

En physique quantique, en revanche, l'espace-temps continue de jouer le rôle d'un réceptacle passif. C'est l'un des symptômes de l'incompatibilité entre la physique quantique et la relativité générale – et de l'inexistence, à ce jour, d'une théorie quantique de la gravitation. Mais les théoriciens ne sont pas à court d'idées. Tout un projet international consiste ainsi à explorer l'hypothèse que l'espace-temps émerge de l'intrication quantique de minuscules entités fondamentales *(voir pages 20 à 26)*. Et deux éminents physiciens ont découvert un lien étonnant entre relativité générale et théorie quantique, en étudiant l'intrication quantique de deux trous noirs *(voir pages 28 à 35)*. Un premier aperçu sur l'intimité quantique de l'espace-temps ? Il serait… temps, la science attend cela depuis près de siècle. ■

sommaire

3 Édito

Actualités

6 Sida : des réservoirs du virus démasqués

7 Changer l'arbre de parenté des dinosaures ?

8 Le méthane, facteur clé de la Grande Oxydation

9 Dans le dédale de l'embryon humain

12 De belles mosaïques à Uzès

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Point de vue
Une stratégie payante : personnifier la nature
Catherine Larrère

16 Homo sapiens informaticus
L'informatique va rompre le lien entre travail et revenu
Gilles Dowek

17 Cabinet de curiosités sociologiques
Le prix de la réciprocité
Gérald Bronner

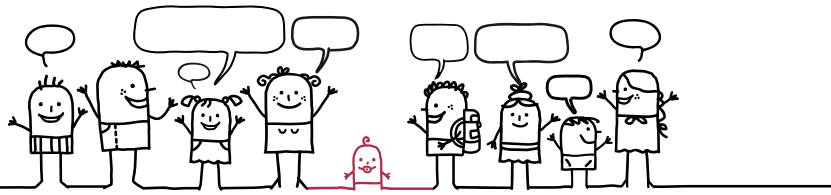
Ce numéro comporte une offre d'abonnement *L'Éléphant* sur une sélection d'abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Malcolm Godwin, Moonrunner Design

À LA UNE

20 PHYSIQUE THÉORIQUE
À la poursuite de l'espace-temps quantique
Clara Moskowitz
L'espace et le temps émergeraient de l'intrication quantique de minuscules bribes d'information : telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé *It from Qubit*.

28 **L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?**
Juan Maldacena
Réconcilier enfin relativité générale et physique quantique ? Un rêve de physiciens qui prendrait corps avec une nouvelle théorie : l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver reliant les deux astres.

36 LINGUISTIQUE
Au-delà de la grammaire universelle
Paul Ibbotson et Michael Tomasello
L'enfant est-il muni de règles de grammaire innées qui lui permettent d'apprendre n'importe quelle langue ? Cette théorie de Noam Chomsky, longtemps dominante, a du plomb dans l'aile. L'enfant apprendrait plutôt de ce qu'il entend, en exploitant des facultés cognitives générales.



© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

44 BIOLOGIE CELLULAIRE
L'indispensable dialogue des cellules
Dale Laird, Paul Lampe et Ross Johnson
La plupart des cellules communiquent avec leurs voisines *via* des myriades de minuscules canaux. Un système de signalisation essentiel tant aux battements cardiaques qu'à la cicatrisation.

54 PALÉONTOLOGIE
Comment les ailes sont venues aux dinosaures
Stephen Brusatte
Les fossiles de dinosaures à plumes du Liaoning, en Chine, révèlent que la transformation de certains dinosaures en oiseaux a été longue. Et que les premières plumes n'avaient rien à voir avec la capacité de voler.

64 GÉNÉTIQUE
Le paradoxe de Huntington
Chiara Zuccato et Elena Cattaneo
Le gène à l'origine de la maladie de Huntington, une maladie neurodégénérative dévastatrice, a joué un rôle crucial dans l'évolution de notre système nerveux.

72 PORTFOLIO
Dans les greniers des lycées
Francis Gires
Fruit d'un périple de longue haleine dans les oubliettes des lycées, une encyclopédie présente près de 1 000 instruments ayant servi à enseigner la physique du XVIIIe siècle au milieu du XXe... Des trésors à remettre au goût du jour !

Rendez-vous

78 Logique & calcul
Quand considère-t-on qu'un théorème est définitivement prouvé ?
Jean-Paul Delahaye
Renforcer la confiance qu'on a dans la preuve d'un théorème difficile est possible. Il faudrait le faire pour le grand théorème de Fermat.

84 Science & fiction
L'imaginaire des profondeurs
J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science
***Terminator* et la petite fleur**
Loïc Mangin

89 Idées de physique
Les infidèles micros de la guitare électrique
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts
Avaler un corps étranger est-il dangereux ?
Bernard Schmitt

94 Science & gastronomie
Le goût du fumé sans ses inconvénients
Hervé This

96 À lire

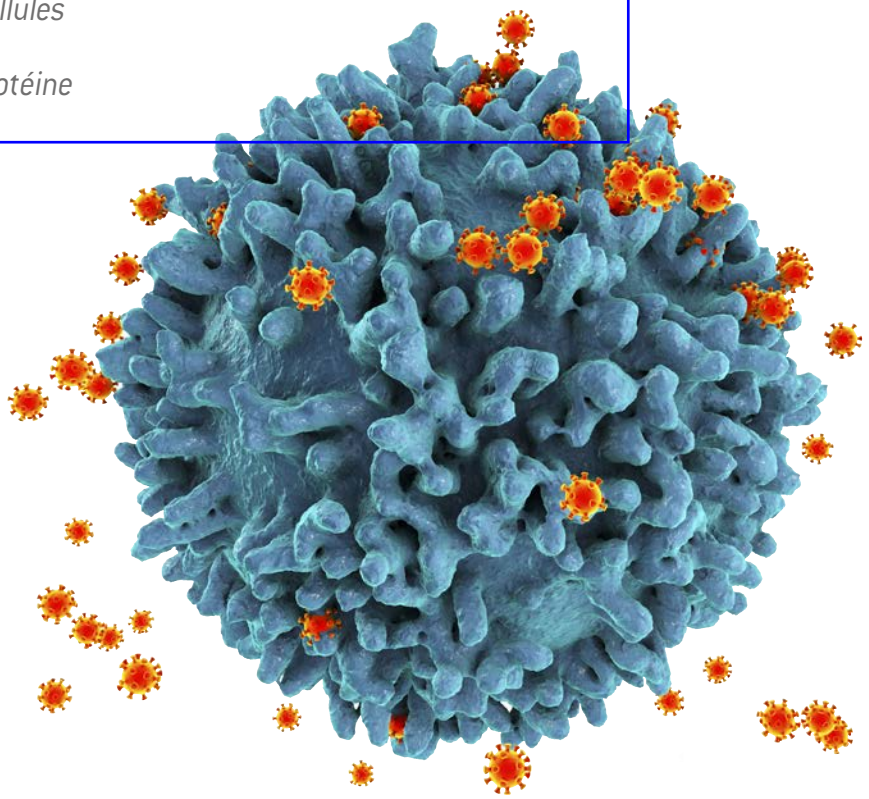
98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Archives numériques
POUR LA SCIENCE.fr
Tous les numéros depuis 1996
Suivez-nous sur les réseaux sociaux

Médecine

Sida : des réservoirs du virus démasqués

Jusqu'alors indétectables, des cellules porteuses silencieuses du virus ont été repérées à l'aide d'une protéine présente à leur surface.



Parmi les lymphocytes T *(en bleu, l'un d'eux)* que le VIH infecte, rien ne permettait de distinguer les réservoirs de virus inactif des cellules non infectées. Il s'avère que les réservoirs portent une protéine que les autres ne produisent pas.

Un patient infecté par le virus du sida doit prendre un traitement à vie. Pour quelle raison ? Les thérapies antirétrovirales empêchent la réplication du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) dans ses cibles, les cellules du système immunitaire appelées lymphocytes T CD4. Cependant, les antirétroviraux ne débusquent pas les réservoirs de ce virus – certains lymphocytes T CD4 qui hébergent son génome sans le traduire en molécules virales. Or, en cas d'arrêt du traitement, ces « cellules dormantes » (de l'ordre de une pour un million de lymphocytes T CD4 infectés), qui peuvent rester silencieuses pendant des années, finissent par se réveiller et relâcher de nouveaux virus dans l'organisme.

Jusqu'à ce jour, ces cellules dormantes étaient indétectables et échappaient à tout traitement. Cependant, avec leurs collègues, Benjamin Descours et Gaël Petitjean, de l'Institut de génétique humaine de l'université de Montpellier (UMR 9002, CNRS), ont découvert un marqueur qui permet de repérer ces réservoirs et qui apporte donc de nouveaux espoirs dans la lutte contre le virus.

Pour détecter ces cellules dormantes, les biologistes ont posé l'hypothèse que leur métabolisme devait présenter des différences. Ils ont donc construit un dérivé génétique du VIH qui produit une protéine fluorescente. Ils ont ensuite infecté avec ce virus fluorescent des lymphocytes T CD4 qui ne répliquaient pas l'ADN viral de façon active, afin de les marquer.

En utilisant une technique de séquençage à haut débit de l'ARN, les chercheurs ont alors regardé si certains gènes étaient davantage exprimés dans les cellules marquées par la protéine fluorescente que dans les autres. Ils ont trouvé que 103 gènes étaient plus exprimés, dont 16 codant des protéines transmembranaires, de bonnes candidates pour identifier et trier les cellules. Parmi ces 16 gènes, le plus exprimé codait une protéine nommée CD32a.

En temps normal, cette protéine est détectée à la surface de diverses cellules du système immunitaire, où elle active plusieurs mécanismes de défense contre des agents pathogènes. Néanmoins, elle n'est jamais produite par les lymphocytes T. Or Benjamin Descours et ses collègues ont découvert que CD32a est présente sur la membrane externe d'environ 50 % des lymphocytes T CD4 dormants infectés, mais pas sur les cellules T non infectées, ni sur celles où le VIH se réplique. À l'aide d'un anticorps commercialisé qui reconnaît la protéine CD32a, les auteurs de l'étude ont même pu isoler les cellules T CD4 qui la produisent des autres.

Des expériences effectuées sur des échantillons sanguins de patients vivant avec le VIH et sous traitement l'ont confirmé : les cellules porteuses du marqueur CD32a contenaient presque toutes le VIH. Et *in vitro*, l'activation de ces cellules a induit une production de virus capables d'infecter des cellules saines. À l'inverse, leur élimination a provoqué un retard de la production virale.

Ce marqueur spécifique pourrait aider les chercheurs à

Wx Paradey, Microscis Artists ©

étudier les lymphocytes T CD4 dormants infectés : il offre un moyen de les purifier et, ainsi, d'obtenir des suspensions de ces réservoirs, indispensables à de nombreuses études.

La découverte du marqueur CD32a soulève toutefois de nouvelles questions : CD32a n'est présente que sur environ 50 % des cellules réservoir du virus. Comment détecter les autres ? La centaine d'autres gènes exprimés par les cellules dormantes coderait-elle d'autres protéines susceptibles de constituer des marqueurs encore plus efficaces ?

Par ailleurs, détruire les cellules exprimant CD32a pourrait être dommageable pour celles qui l'expriment en temps normal, sans être infectées. De plus, les auteurs de l'étude se sont intéressés uniquement aux lymphocytes T CD4 du sang, qui ne représentent que 2 % tout au plus des cellules T CD4 infectées dans tout l'organisme. Reste à savoir si ce marqueur est aussi présent sur les lymphocytes infectés latents présents notamment dans les ganglions et le tissu digestif.

Néanmoins, pour Christine Rouzioux, du Laboratoire de virologie de l'hôpital Necker, à Paris, et de l'université Paris-Descartes, « cette étude est très intéressante, c'est un joli modèle. On ne sait pas encore grand-chose sur la protéine CD32a, mais cela devrait être un bon outil pour avancer ». De nombreuses études sont encore nécessaires avant de pouvoir crier victoire face au virus responsable du sida, mais ces travaux ouvrent une nouvelle voie particulièrement encourageante.

Aline Gerstner

B. Descours et al., Nature, vol. 543, pp. 564-567, 2017

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Paléontologie

Changer l'arbre de parenté des dinosaures ?

Avec des collègues, Matthew Baron, du Muséum de Londres, vient de réétudier l'arbre de parenté des dinosaures. Surprise : les dinosaures qui ont donné les oiseaux, que l'on regroupait depuis un siècle avec les grands dinosaures herbivores, sont désormais rapprochés d'une tout autre famille : celle du tricératops. Le paléontologue Eric Buffetaut commente.

Quelle classification traditionnelle ce travail remet-il en cause ?

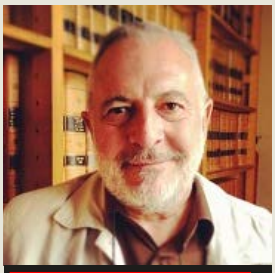
Eric Buffetaut : Celle que proposa le paléontologue britannique Harry Govier Seeley en 1888 : elle suppose une grande dichotomie au sein des dinosaures, fondée sur la structure du bassin. Seeley distinguait les saurischiens, c'est-à-dire les « bassins de lézard », des ornithischiens, ou « bassins d'oiseaux ». Ces étymologies sont avant tout inspirées de l'observation et n'impliquent *a priori* pas de parenté entre saurischiens et lézards, ni entre ornithischiens et oiseaux.

Cette nouvelle classification phylogénétique vous semble-t-elle plus logique ?

E. B. : Dans ce nouveau système, les dinosaures théropodes, qui ont donné les oiseaux et qui faisaient partie des saurischiens pour Seeley, se retrouvent avec les ornithischiens, qui comprennent les cératopsidés – des dinosaures à cornes – et de nombreuses sortes d'autres dinosaures herbivores ou omnivores. Les ornithischiens et les théropodes sont censés former désormais un nouveau groupe, celui des ornithoscélidés, ou « cuisses d'oiseaux ». Cette nouvelle classification traduit une nouvelle logique, mais elle ne me semble pas plus rationnelle que l'ancienne.

A défaut d'être plus logique, ce regroupement des ornithischiens avec les théropodes est-il important ?

E. B. : Pas à cause de leurs bassins en tout cas, car les ornithischiens peuvent avoir eu des « bassins d'oiseaux » pour des raisons sans rapport avec l'origine de celui des oiseaux. Plus significatif serait le fait que l'on sait depuis peu de temps que certains ornithischiens avaient, sinon des plumes, du moins des filaments de kératine sur le corps, ce qui les rapproche notamment des théropodes et des nombreux « dinosaures à plumes » dont sont issus les oiseaux.



Eric Buffetaut, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris.

En fait, la vraie révolution avec cette classification est qu'elle sépare les théropodes des grands sauropodes, tels que les diplodocus, alors que l'on pensait depuis plus d'un siècle leur origine commune.

La question est donc de savoir si l'on accepte la nouvelle classification ?

E. B. : Oui. Pour l'établir, Matthew Baron et ses collègues ont comparé 74 espèces de dinosaures archaïques en se servant de 457 caractères pour faire apparaître des groupes descendant d'un même ancêtre, ce que l'on nomme des clades.

Il ne faut pas se laisser impressionner par le nombre de caractères : j'ai vu des analyses phylogénétiques fondées sur plus de 1 000 caractères, qui se sont révélées entièrement fausses… Il va donc falloir examiner de très près la pertinence des caractères choisis par l'équipe de Matthew Baron pour établir sa classification. Je serai très étonné si elle n'est pas contestée. Nous verrons.

Si l'on suppose cette classification pertinente, nous dit-elle quelque chose sur l'origine géographique des dinosaures ?

E. B. : Non, car lorsque les premiers dinosaures sont apparus il y a quelque 230 millions d'années, au Trias moyen, toutes les terres issues du supercontinent de la Pangée étaient encore connectées. Il n'y a donc pas eu de grande différenciation des faunes en fonction de la géographie, comme ce sera le cas plus tard, tout particulièrement au Crétacé, une fois les grands continents bien séparés.

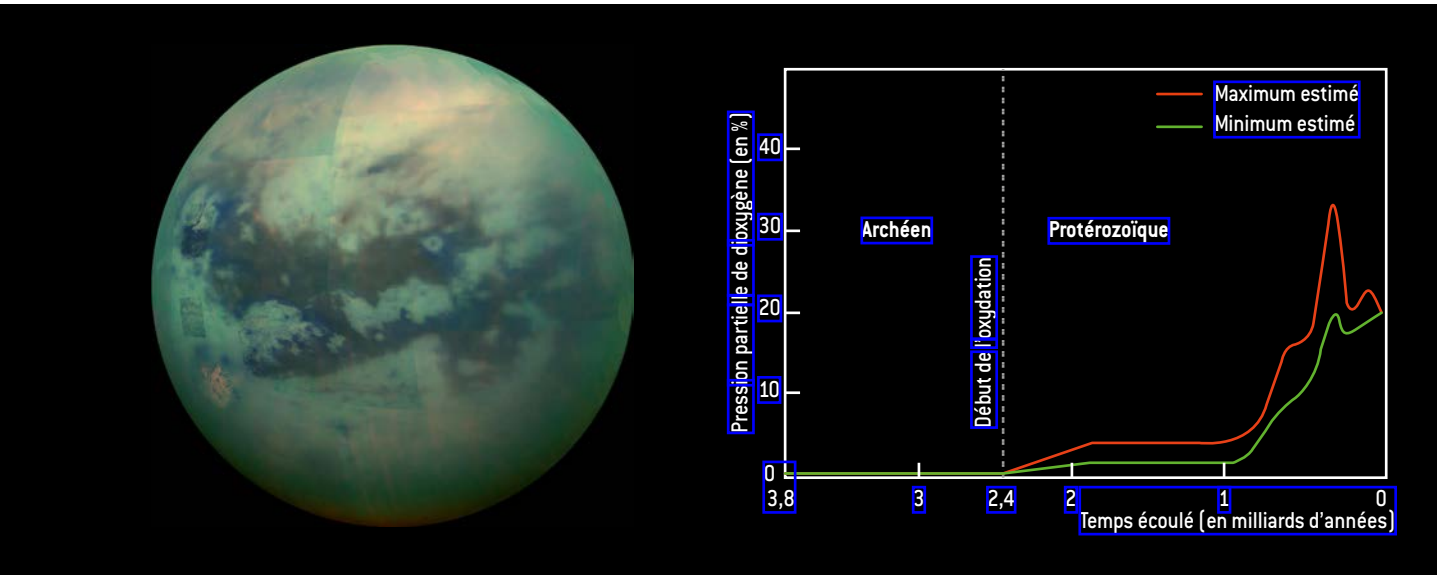
François Savatier

Nature, vol. 543, pp. 501-506, 2017

Géochimie

Le méthane, facteur clé de la Grande Oxydation

Il y a 2,4 milliards d'années, l'oxygénation de l'atmosphère terrestre par les bactéries photosynthétiques aurait été facilitée, voire rendue possible, par l'activité préalable des bactéries productrices de méthane.



© Nasa/Lunarnewz

Titan, lune de Saturne *(ci-dessus)*, est entouré d'un halo de méthane probablement similaire à celui de la Terre juste avant la Grande Oxydation, événement capital dans l'histoire de la vie *(ci-dessus à droite)*.

La teneur atmosphérique en dioxygène a été **multipliée par 100 000** depuis la Grande Oxydation, il y a 2,4 milliards d'années.

Il y a 2,4 milliards d'années, au Protérozoïque, ère qui suit l'Archéen, l'atmosphère terrestre s'est fortement enrichie en dioxygène *(voir la courbe ci-dessus)*. Deux principaux mécanismes sont supposés expliquer cet événement nommé Grande Oxydation : la photosynthèse d'une part, accompagnée par un enfouissement de matière organique dans les sédiments ; l'échappement d'hydrogène vers l'espace d'autre part, qui réduit le piégeage de l'oxygène sous la forme d'eau (H_2O). Or avec des collègues, Gareth Izon, de l'université de Saint Andrew, en Écosse, vient de présenter un scénario accréditant l'idée qu'une production biologique massive de méthane (CH_4) aurait déclenché une évacuation massive de l'hydrogène planétaire.

Dans l'ouest du bassin sédimentaire du Griqualand, en Afrique du Sud, les chercheurs ont mis en évidence, à 840 mètres de profondeur, dans une strate d'époque juste antérieure à la Grande Oxydation, de brutales variations des rapports isotopiques $^{36}S/^{32}S$ et $^{33}S/^{32}S$, relatifs au soufre, et une baisse du rapport $^{13}C/^{12}C$, pour le carbone.

Ces changements signent l'arrivée massive de méthane dans l'atmosphère. Pourquoi ? En conditions anaérobies, le métabolisme des bactéries sulfato-réductrices, qui « respirent » des sulfates et produisent des sulfures, conduit à de légères différences entre les abondances des isotopes de soufre. Toute variation dans leurs proportions signale une évolution de l'atmosphère.

De quels changements s'agissait-il ? L'enrichissement concomitant des sédiments marins en carbone 12 indique une production massive de méthane. En effet, les bactéries méthanogènes synthétisent plus de méthane à partir de carbone 12 qu'à partir de carbone 13. Lorsque ces bactéries abondent, elles accumulent le méthane à carbone 12, lequel finit donc par s'amasser dans les sédiments marins.

La modélisation de l'atmosphère archéenne réalisée par les chercheurs suggère que les variations mesurées s'expliquent au mieux si l'on admet que juste avant la Grande Oxydation, les bactéries méthanogènes ont, pendant un million d'années, créé dans l'atmosphère une brume de méthane comparable à celle présente sur Titan, la lune de Saturne. Parvenues dans la haute atmosphère, les molécules CH_4 auraient été dissociées par le rayonnement solaire, et des masses énormes d'hydrogène se seraient ainsi échappées dans l'espace.

À la fin de l'Archéen, la multiplication de tels épisodes aurait considérablement diminué le caractère réducteur de l'atmosphère. Ensuite, l'activité des bactéries photosynthétiques ainsi qu'un autre processus, la dissociation de molécules d'eau par le rayonnement solaire dans la haute atmosphère, ont peu à peu augmenté la teneur atmosphérique en dioxygène – qui est aujourd'hui environ 100 000 fois celle atteinte par la Grande Oxydation.

F. S.

PNAS, vol. 114, pp. E2571-E2579, 2017

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

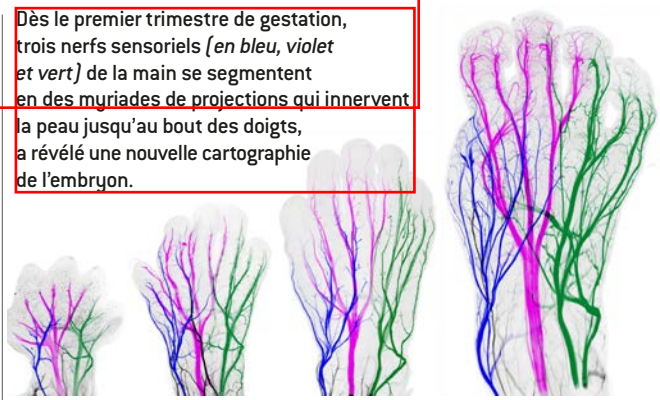
Embryologie

Dans le dédale de l'embryon humain

Cartographier l'embryon humain en trois dimensions à l'échelle cellulaire et au fil de son développement, c'est ce qu'a entrepris une équipe de l'Institut de la vision (UPMC/Inserm/CNRS), à Paris, et du centre de recherche Jean-Pierre Aubert (université de Lille, CNRS), sous la direction d'Alain Chédotal.

Auparavant, on obtenait des reconstructions tridimensionnelles à partir de milliers d'embryons et de fœtus morts dont on analysait de fines coupes au microscope, aux différents stades du développement. Aujourd'hui, de nouvelles techniques d'imagerie permettent de visualiser l'intérieur de l'embryon entier au cours du premier trimestre de développement. À l'aide d'anticorps fluorescents, Alain Chédotal et ses collègues ont marqué certaines protéines spécifiques des cellules qu'ils voulaient suivre ; puis ils ont rendu l'embryon transparent en le plongeant dans plusieurs solvants, ce qui élimine les membranes des cellules tout en préservant leur architecture protéique. Enfin, en utilisant un microscope à haute résolution dit à feuillet de lumière, qui balaye l'échantillon avec un plan lumineux (et non un point, comme les microscopes classiques), ils ont scanné l'embryon.

Le résultat est spectaculaire. En analysant 36 embryons et fœtus de 6 à 14 semaines avec 70 anticorps, les biologistes ont obtenu des cartes précises du développement des systèmes musculaire, vasculaire, cardiopulmonaire, urogénital et du système nerveux périphérique. Ils ont ainsi montré que la vascularisation des voies génitales se différencie au moment où le sexe se détermine. L'idée est à présent d'enrichir ces données afin de construire un atlas 3D de l'embryon humain, disponible sur Internet tant pour l'enseignement que pour préciser les mécanismes de régulation de son développement.



Dès le premier trimestre de gestation, trois nerfs sensoriels *(en bleu, violet et vert)* de la main se segmentent en des myriades de projections qui innervent la peau jusqu'au bout des doigts, a révélé une nouvelle cartographie de l'embryon.

© Morgane Belle et Alain Chédotal, Institut de la vision, UPMC/Inserm/CNRS, avec le concours de Fondation Voir et Entendre

Marie-Neige Cordonnier

M. Belle et al., Cell, vol. 169, pp. 161-173, 2017

Asthme et hygiène

Pourquoi l'asthme est-il de plus en plus répandu, en particulier dans les pays développés ? Une hypothèse est que ce serait dû à l'hygiène excessive qui caractérise nos vies urbaines. Des études épidémiologiques ont en effet montré que s'exposer à un environnement riche en microbes protège contre le développement d'allergies, dont l'asthme. Toutefois, le mécanisme en jeu restait inconnu. Catherine Sabatel et Coraline Radermecker, de l'université de Liège, en Belgique, et leurs collègues ont mis en évidence une explication.

En exposant des souris à des fragments d'ADN bactérien connus pour moduler la réponse immunitaire de modèles animaux, les biologistes ont montré que ces fragments augmentent la production de macrophages à partir d'un réservoir situé dans la rate. Ces macrophages s'infiltrent dans les poumons, où ils protègent les souris contre l'asthme en présence d'allergènes. Injectés à des souris asthmatiques, ils les guérissent. Reste à savoir si un mécanisme similaire est à l'œuvre chez l'homme.

Astrophysique

Un même axe de rotation pour plusieurs étoiles

Les étoiles naissent dans de gigantesques nuages de gaz et de poussière opaques. La connaissance du processus de leur formation repose donc surtout sur des modèles dont les détails restent à établir. En étudiant des étoiles anciennes, Enrico Corsaro, du CEA-Saclay, et ses collègues ont montré que ces astres ont hérité certaines propriétés des conditions de leur naissance au sein des nuages de gaz.

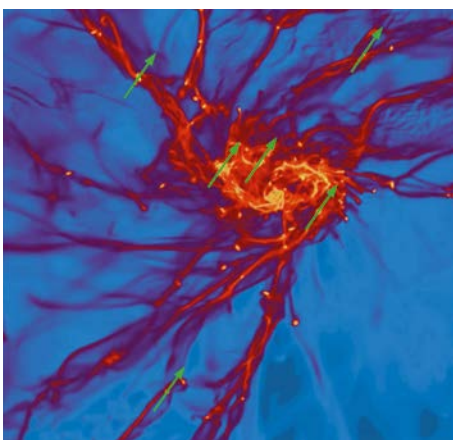
Les chercheurs se sont intéressés à 48 géantes rouges, de une à deux masses solaires, appartenant à deux amas anciens. Par la technique d'astérosismologie, l'étude des modes de vibration des étoiles, ils ont montré que dans un même amas, environ 70 % des axes de rotation de ces étoiles pointent dans la même direction.

Ce résultat est étonnant, car dans les modèles d'effondrement des nuages de gaz et de formation des étoiles, les importants phénomènes de turbulence, engendrés par les mouvements désordonnés du gaz, conduisent à une distribution aléatoire de la direction des axes de rotation. Pour expliquer l'alignement de ces axes dans les amas étudiés, les chercheurs suggèrent que le mouvement de rotation du nuage était assez important pour s'imprimer dans l'orientation des axes des étoiles.

Pour le vérifier, ils ont effectué des simulations numériques d'un nuage de gaz en effondrement. Ils ont montré que les propriétés de rotation du nuage sont transférées aux étoiles individuelles si au moins 50 % de l'énergie cinétique du nuage est sous forme d'énergie rotationnelle. En outre, seules les étoiles de masse supérieure à 0,7 fois celle du Soleil préservent ces caractéristiques. Les étoiles plus légères sont plus sensibles aux turbulences : leur axe de rotation prend donc une direction aléatoire.

Sean Bailly

E. Corsaro et al., Nature Astronomy, en ligne le 13 mars 2017



© E. Corsaro

Lorsqu'un nuage de gaz et de poussière s'effondre sur lui-même, le mouvement de rotation initial laisse son empreinte sur les axes de rotation *(en vert)* des étoiles formées.

Le plus vieux des Portugais

Le très vieux crâne humain que l'équipe du paléoanthropologue João Zilhão a découvert il y a deux ans dans la grotte d'Aroeira, au Portugal, vient d'être étudié. La roche qui le contenait ayant pu être datée précisément, on sait aujourd'hui que le plus vieux des Portugais connu a vécu il y a quelque 400 000 ans. À quelle espèce humaine appartient-il ? À *Homo heidelbergensis* indubitablement, même si certains de ses caractères diffèrent de ceux des crânes de même époque, un reflet de la diversité de cette espèce en Europe.

Envie de jouer contagieuse

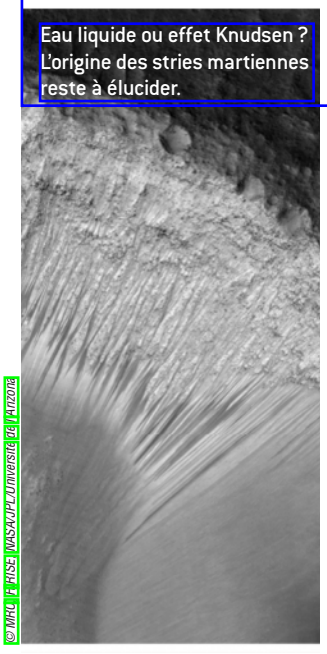
Le kéa, un perroquet néo-zélandais, est parfois d'humeur joueuse. Le cri qu'il lance dans cette situation « contamine » ses congénères et les pousse eux aussi à adopter un comportement de jeu. Et ils poursuivent cette activité plus longtemps qu'en entendant d'autres types de cris. Cette découverte d'une équipe de l'institut de recherche Messerli, en Autriche, fait du perroquet le premier non-mammifère à présenter une vocalisation « émotionnellement contagieuse ». De précédentes études avaient montré des comportements similaires chez les chimpanzés et les rats.

Bientôt le nouveau kelvin

L'unité de température, le kelvin, est définie à partir du point triple de l'eau, mais les métrologues ont décidé de la redéfinir à partir d'une constante plus fondamentale, celle de Boltzmann (qui relie l'énergie cinétique des molécules d'un gaz parfait à la température). Le changement se fera en 2018 sous certaines conditions. Il faut d'abord mesurer la constante de Boltzmann avec une précision de un millionième par deux méthodes indépendantes. Cet objectif est maintenant atteint grâce au dispositif d'une équipe de l'agence allemande de métrologie. Tout est prêt pour 2018 !

Géosciences

Nouvelle explication pour les stries martiennes



Eau liquide ou effet Knudsen ? L'origine des stries martiennes reste à élucider.

© NASA/JPL/University of Arizona

En 2010, la caméra HiRISE de la sonde *MRO*, en orbite autour de Mars, a photographié des structures qui pourraient traduire la présence actuelle d'eau liquide : de longues stries sombres et éphémères qui se forment l'été sur les versants de certaines montagnes. Frédéric Schmidt, du laboratoire Geops, à l'université Paris-Saclay, et ses collègues proposent une autre explication… sans eau liquide.

Le problème avec le scénario aqueux est que les stries se forment dans des régions très sèches. L'eau disponible semble donc insuffisante pour recharger chaque année les lignes sombres. En outre, il n'y a pas eu de détection directe d'eau liquide dans les stries.

Frédéric Schmidt et ses collègues se sont intéressés à des écoulements granulaires en l'absence d'eau et ont considéré l'effet Knudsen : du fait de l'éclairement solaire et de la pression atmosphérique très basse, le gaz contenu dans le sol chauffé par le Soleil s'en échappe, ce qui déstabilise les grains des couches supérieures et provoque une coulée. Les grains les plus grossiers restent sur le dessus, d'où la couleur foncée des stries. Après l'été, la strie, recouverte par des grains fins apportés par le vent martien, s'efface.

Les chercheurs ont modélisé ce processus et constaté qu'il déclenche une coulée pour les pentes d'environ 30 degrés d'inclinaison, en accord avec ce que voient les sondes en orbite autour de Mars.

S. B.

F. Schmidt et al., Nature Geoscience, en ligne, 20 mars 2017

Insolite

Une grenouille sous les feux des projecteurs

C'est une première chez les amphibiens. Des chercheurs ont découvert que la rainette ponctuée, une grenouille sud-américaine, est fluorescente. Éclairée par un faisceau ultraviolet, elle brille d'une intense lueur bleu vert. Les molécules fluorescentes de la rainette ponctuée ne ressemblent à aucune de celles trouvées chez d'autres animaux fluorescents. Toute la lumière n'a pas encore été faite sur ce phénomène.

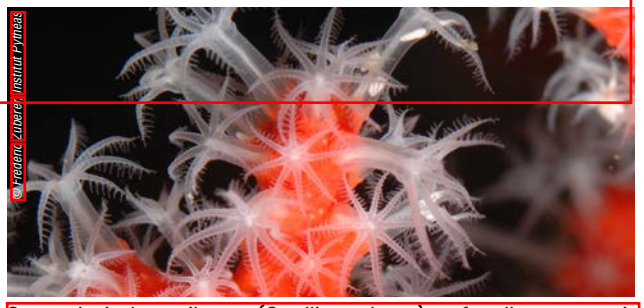
© J. Yanovier et C. Taboada, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" – CONICET

Évolution

Comment le corail rouge devient mâle ou femelle

À l'œil, rien ne ressemble plus à un corail rouge qu'un autre corail rouge. Pourtant, cette espèce méditerranéenne présente des individus mâles et femelles, que l'on sait identifier en les disséquant. Mais jusqu'à présent, le mode de déterminisme sexuel était inconnu – ce qui ne facilitait pas la protection de cet animal colonial, dont les populations sont perturbées tant par son exploitation pour la bijouterie que par le réchauffement climatique. Marine Pratlong, d'Aix Marseille Université, et ses collègues viennent de mettre au jour ce mécanisme.

Les biologistes ont exploré le génome du corail en quête d'éventuelles marques génétiques similaires aux chromosomes XX/XY des mammifères. En examinant des endroits particulièrement variables du génome chez 354 individus, ils ont mis en évidence des variants spécifiques des femelles, identiques sur les deux copies de leurs gènes, alors que les mâles portaient des variants différents à ces endroits, et inversement. De plus, ce critère seul a suffi pour déterminer le sexe de coraux dans 95 % des cas. Les coraux rouges ont donc bien un système de déterminisme sexuel génétique de type XX/XY, comme les mammifères, très probablement apparu indépendamment.



Cette colonie de corail rouge *(Corallium rubrum)* est femelle : on aperçoit des larves blanches dans ses polypes. Cela se lit aussi dans ses gènes.

M.-N. C.

M. Pratlong et al., Royal Society open science, vol. 4, 160880, 2017

Très ancien fossile végétal

Le plus ancien fossile d'organisme eucaryote (à une ou plusieurs cellules avec noyau) était celui d'une algue rouge datant de 1,2 milliard d'années. Mais cette date pourrait être reculée grâce à la découverte de l'équipe de Stefan Bengtson, du Muséum d'histoire naturelle de Suède.

Les chercheurs ont mis au jour des fossiles bien conservés en Inde qui auraient 1,6 milliard d'années. Ils en ont analysé la structure par tomographie aux rayons X et noté que ces organismes partagent des caractéristiques avec des algues rouges. Certains éléments trouvés dans les cellules fossilisées ressemblent à des chloroplastes, organelles liées à la photosynthèse. Ainsi, l'histoire des plantes et des eucaryotes serait plus ancienne qu'on ne le pensait.

Paléontologie

L'oiseau Gargantua espagnol

Un os énigmatique par sa taille vient d'être identifié. Une équipe internationale de chercheurs, comprenant notamment Delphine Angst, de l'université du Cap, en Afrique du Sud, et Eric Buffetaut, de l'École normale supérieure à Paris, vient d'établir à quelle espèce appartient un synsacrum trouvé dans le gisement espagnol de Laño, qui date de 72 millions d'années.

Un synsacrum est, chez les dinosaures et les oiseaux, un os composé de plusieurs vertèbres soudées entre elles et sur lesquelles s'attachent les éléments du bassin. Afin d'identifier celui de Laño, l'équipe a recherché des os similaires dans les gisements d'époque comparable qu'elle connaissait. Ceux qu'elle a trouvés dans des sites de l'Aude, de l'Hérault et du Var ont conduit à attribuer l'os de Laño à l'« oiseau Gargantua ».

Son nom d'espèce – *Gargantuavis philoinos* – fait allusion à un oiseau géant comparable, selon Eric Buffetaut, aux moas, d'anciens oiseaux herbivores néo-zélandais mesurant jusqu'à 3,6 mètres de haut et qui avaient pour seul prédateur un aigle. L'os de Laño montre ainsi que l'aire de répartition de l'oiseau Gargantua s'étendait sur l'ensemble de l'île ibéro-armoricaine, île qui, au Crétacé supérieur, regroupait le sud de la France actuelle et la péninsule Ibérique.

F. S.

D. Angst et al., Annales de Paléontologie, en ligne le 15 février 2017

© X. Carmelo Corta

Le synsacrum de Laño, en vues latérale et ventrale. Cet os d'une dizaine de centimètres de long appartenait à un oiseau géant.

Astrophysique

Pétillants lacs de Titan

L'azote, qui représente près de 98 % de l'atmosphère de Titan, se dissout abondamment dans le méthane et l'éthane liquides qui remplissent les mers de cette lune de Saturne. L'équipe de Michael Malaska, du JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), aux États-Unis, a étudié la solubilité de l'azote dans les hydrocarbures aux conditions de température et de pression régnant sur Titan. Ces chercheurs ont montré que l'équilibre est instable et qu'une petite perturbation provoque un important dégazage d'azote, à la manière d'une boisson contenant du dioxyde de carbone dissous. Les bulles ainsi produites expliqueraient un phénomène éphémère surnommé « île magique » et observé par la sonde *Cassini* : une zone devenue momentanément très claire sur l'une des mers d'hydrocarbures de Titan. Plusieurs hypothèses avaient été avancées, dont celle d'un dégazage, un scénario conforté par ces nouveaux résultats.

S. B.

M. Malaska et al., Icarus, vol. 289, pp. 94-105, 2017

Archéologie

De belles mosaïques à Uzès

Deux grandes et magnifiques mosaïques viennent d'être mises au jour à Ucetia, l'Uzès romaine (Gard). Elles recouvrent le sol de la pièce principale d'un bâtiment de 250 mètres carrés, qui semble avoir été un édifice public, comme le confirme la qualité des mosaïques et du sol de deux de ses quatre pièces.

Ainsi, un mortier rose incrusté de tesselles (éléments de mosaïques) couvre le sol d'une antichambre, laquelle mène à une salle d'apparat mesurant 60 mètres carrés et ornée des deux grandes mosaïques polychromes. Les motifs géométriques de celles-ci encadrent deux médaillons centraux formés de couronnes, de rayons et de chevrons, dont l'un est flanqué de quatre animaux : un hibou, un canard, un aigle et un faon. Plusieurs autres bâtiments construits au Ier siècle avant notre ère ou après témoignent de l'opulence de l'agglomération fondée par les colons romains tout près des sources alimentant l'aqueduc de Nîmes.

F. S.

www.inrap.fr

© Denis Gissinger/Inrap

Le médaillon central de l'une des deux grandes mosaïques d'Uzès est encadré de quatre animaux polychromes *(image du haut)*, dont un hibou expressif campé sur ses pattes *(détail ci-dessus)*.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Environnement

Un bilan sur la Méditerranée

Du fait des activités humaines (surpêche, pollution et réchauffement climatique), on sait que l'écosystème de la mer Méditerranée est menacé. Cependant, seules des études régionales avaient été réalisées. Marta Coll, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD, à Sète) et une équipe internationale ont rassemblé les données concernant l'ensemble du bassin depuis les années 1950. Les chercheurs estiment que, sur cette période, les populations de poissons ont diminué d'environ 34 %, et même, pour les prédateurs supérieurs, de 40 %. Et, d'après une modélisation numérique, l'impact du réchauffement climatique, à l'origine d'une diminution de la biomasse planctonique, semble supérieur à celui de la surpêche. Ces résultats fournissent un état des lieux qui sera utile pour étudier l'évolution future de cet environnement fragile.

S. B.

C. Piroddi et al., Scientific Reports, vol. 7, 44491, 2017

Neurosciences

Un engrais pour les neurones

Dans la plupart des maladies neurologiques – Alzheimer, sclérose en plaques, lésion de la moelle épinière... –, des neurones se dégradent, et leur axone – le principal prolongement – ne transmet plus les signaux, soit parce qu'il dégénère, soit parce qu'il est rompu. Les chercheurs ont trouvé des protéines neuronales capables de favoriser sa repousse. Encore faut-il les activer *in vivo*...

L'équipe d'Alyson Fournier, à l'université McGill, à Montréal, a étudié une molécule naturelle produite par un champignon (*Phomopsis amygdali*), la fusicoccine A, qui fait pousser les racines des plantes infectées par le champignon. Les chercheurs ont découvert que cette molécule stabilise aussi l'une des protéines neuronales, un « adaptateur » moléculaire nommé 14-3-3, qui devient inactif, car instable, quand les cellules vieillissent. En interagissant avec la fusicoccine A, 14-3-3 stimule alors la régénération des axones de neurones du cortex animal ou humain *in vitro*, mais également celle du nerf optique de souris qui avait été détruit au préalable. Cet « engrais » va maintenant être testé chez des animaux atteints de maladies neurodégénératives.

Bénédicte Salthun-Lassalle

A. Kaplan et al., Neuron, vol. 93, pp. 1082-1093, 2017

Biologie animale

Un superpouvoir des tardigrades élucidé

Les tardigrades, groupe de minuscules animaux proche de celui des arthropodes, résistent à presque tout : chaleur, froid, ultraviolets, rayons X, haute pression, asphyxie, produits chimiques, séjour dans l'espace…

Ces « oursons d'eau » ont aussi la capacité de rester plusieurs dizaines d'années en dessiccation complète, après avoir perdu 97 % de leur eau. Jusqu'à présent, le mystère de leur survie dans ces conditions était resté entier. Thomas Boothby, de l'université de Caroline du Nord à Chapel Hill, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert que des protéines spécifiques, en se vitrifiant, contribuent à protéger l'organisme de la dessiccation.

Les tardigrades produisent en effet un type de protéines dites intrinsèquement désordonnées, qui ont la particularité, contrairement à la plupart des protéines, de ne pas avoir de structure tridimensionnelle fixe. Chez les tardigrades, ces protéines sont nommées TDP. Chez de nombreuses espèces de tardigrades, lors de la dessiccation, les TDP sont produites en grande quantité. Lorsque les chercheurs ont bloqué leur expression, les tardigrades n'ont pas survécu.

L'étude a aussi montré que la tolérance à la dessiccation de levures et de bactéries à qui l'on fait produire les protéines TDP augmente. Une hypothèse est que, grâce à leur malléabilité, les TDP formeraient une sorte de matrice qui préviendrait la dénaturation des molécules sensibles à la dessiccation. Une piste pour conserver des médicaments qui, aujourd'hui, nécessitent une réfrigération ?

A. G.

Molecular Cell, vol. 65, pp. 1-10, 2017

Les tardigrades résistent à des conditions extrêmes. En particulier, ils sont capables de survivre à une déshydratation importante, une perte de près de 97 % de leur eau, grâce à certaines protéines.

Yves Meyer, Prix Abel 2017

Compression de données, imagerie médicale, traitement des images du télescope spatial *Hubble* ou, plus récemment, des signaux d'ondes gravitationnelles enregistrés par l'interféromètre *Ligo*, l'analyse par ondelettes est présente dans de très nombreux domaines. L'Académie norvégienne des sciences et des lettres a ainsi décidé de récompenser, avec ce prix au prestige équivalent à celui du Nobel, le mathématicien français Yves Meyer, qui a joué un rôle capital dans le développement de la théorie des ondelettes.

La faune lumineuse des océans

Quelle est la part de la faune bioluminescente dans les profondeurs des océans ? Pour effectuer un relevé précis, Séverine Martini et Steven Haddock, de l'institut de recherche de l'aquarium de Monterey Bay, en Californie, ont analysé plus de 350 000 observations réalisées par des ROV (des véhicules sous-marins téléguidés). Résultat : plus des trois quarts des espèces sont bioluminescentes et cette proportion est relativement stable sur toute la colonne d'eau, même si le nombre d'espèces diminue avec la profondeur. Chez les cnidaires (méduses et consorts), ce chiffre dépasse les 95 % !

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Une stratégie payante : personnifier la nature

En matière de protection de la nature, les arguments scientifiques suffisent rarement. En accordant le statut de personne juridique à un fleuve, le Parlement néo-zélandais a révélé une issue possible : la défense des droits de la nature en tant que bien commun.

Catherine LARRÈRE

Le 15 mars 2017, le Parlement néo-zélandais a accordé le statut de personne juridique au fleuve Whanganui, un cours d'eau cher aux Maoris. Cette décision n'est pas restée isolée. Le 20 mars, la haute cour de l'État himalayen de l'Uttarakhand (nord) a décrété que le Gange et la Yamuna, où les hindous pratiquent des ablutions, seraient désormais considérés comme des « entités vivantes ayant le statut de personne morale ». Comment interpréter de telles décisions ? Faut-il y voir la victoire d'une vision religieuse de la nature, ou se dire que l'on protège mieux la nature quand elle est reconnue comme sacrée qu'avec de simples arguments scientifiques ? Ni l'un ni l'autre : elles révèlent surtout à quel point la protection de la nature doit s'appuyer sur la culture locale.

Lorsque, à la fin des années 1960, une organisation environnementale, le Sierra Club, avait voulu empêcher l'entreprise Walt Disney de créer une station de ski dans une haute vallée californienne, Mineral King, elle avait attaqué l'entreprise en justice. Mais le tribunal avait débouté le Sierra Club au motif que ce projet ne le lésait pas personnellement. Constatant avec cette affaire que le droit existant (celui des différents États, comme le droit international) était insuffisant pour protéger la nature, Christopher Stone, professeur de philosophie du droit, publia en 1972 un article qui fit date, « Should trees have standing ? » (« Les arbres devraient-ils pouvoir soutenir une action en justice ? »). Il argua que les arbres eux-mêmes devraient pouvoir plaider, car ils seraient les victimes directes. Il fallait donc reconnaître à la vallée Mineral King une personnalité juridique permettant au Sierra Club de représenter ses intérêts.

Les décisions de mars dernier sont-elles un signe que Christopher Stone a enfin été entendu ? À vrai dire, ce ne sont pas les premières de ce type. En 2008, l'Équateur a fait de la nature un sujet de droit en inscrivant dans sa constitution les droits de la Terre Mère : « La nature ou Pacha Mama, où se reproduit et se réalise la vie, a droit au respect absolu de son existence et au maintien et à la régénération de ses cycles vitaux, de ses fonctions et de ses processus évolutifs. Toute personne, communauté, peuple ou nation, pourra exiger de l'autorité publique le respect des droits de la nature » (article 72). Et ces dernières années, des collectivités locales de certains comtés des États-Unis ou au Mexique ont reconnu que les communautés naturelles et les écosystèmes ont, comme les personnes, des droits qui peuvent être représentés en justice.

Cette décision révèle à quel point la protection de la nature doit s'appuyer sur la culture locale

L'argumentation de Christopher Stone avait d'abord une visée pratique : si, pour s'opposer à la destruction ou à la dégradation irréversible d'espaces naturels, il faut montrer que des droits humains sont lésés, l'action en justice est beaucoup plus difficile que si l'on peut plaider directement qu'il y a atteinte à la nature. Or, le droit a toutes les ressources nécessaires pour cela. Il construit des fictions et peut ainsi accorder la personnalité juridique à des entités abstraites, qualifiées de personnes morales, comme des entreprises ou un hôpital. Pourquoi ne ferait-on pas de même avec des entités naturelles ? C'est une démarche technique qui permet d'engager un certain type de procédures. Christopher Stone montrait que l'on trouverait sans peine des représentants pour les entités naturelles ainsi personnifiées, comme on le fait pour des enfants en bas âge ou des adultes ayant perdu l'usage de leurs capacités. Ajoutons qu'une telle qualification juridique, purement technique, suppose (pour la plaidoirie) l'étude scientifique des dommages causés à ces entités naturelles et n'affaiblit nullement les droits des personnes humaines.

Mais, si reconnaître à des non-humains (comme un fleuve) une personnalité juridique ne pose pas de problème d'un point de vue technique, le droit n'est pas un pur instrument : il a une dimension anthropologique, philosophique et culturelle. C'est pourquoi, là où domine la culture occidentale, qui établit une nette séparation entre l'humanité et la nature, entre les personnes et les choses, on a du mal à admettre que l'on puisse transformer

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

des choses – ou ce qui est considéré tel – en sujets de droit, même par un artifice juridique. Nous autres Occidentaux voulons bien admettre que des institutions (églises, écoles, entreprises) soient des personnes morales, mais nous nous y refusons quand il s'agit d'entités naturelles. C'est notre rapport à la nature, fortement anthropocentré, qui nous conduit à rejeter l'attribution de la personnalité juridique à des entités naturelles, même si, techniquement, rien ne s'y oppose.

Les décisions de mars dernier montrent qu'il ne suffit pas de dire que n'importe quoi peut être personnifié juridiquement, il faut y croire. Pour faire d'un fleuve un sujet de droit, il faut croire que c'est une personne, une entité vivante, qui a peut-être un esprit, ou une âme, que l'on révère comme une personne sacrée. C'est donc dans des pays et des cultures où l'on ne considère pas la nature comme une matière inerte, manipulable à loisir, que l'on reconnaît des droits à des entités naturelles.

Aussi l'attribution d'une personnalité juridique au fleuve Whanganui est-elle indissociable de la reconnaissance de la culture des Maoris et de la lutte qu'ils ont menée depuis l'arrivée des colons britanniques en Nouvelle-Zélande à la fin du XIXe siècle. C'est bien ce qu'a admis le ministre de la Justice néo-zélandais : « Cela marque la fin du plus long litige de l'histoire [...]. Cette législation est une reconnaissance de la connexion profondément spirituelle entre l'*iwi* – la tribu – Whanganui et son fleuve ancestral. »

De la même façon, la constitution équatorienne a pour premier objet de reconnaître les droits des peuples amérindiens. On voit à quel point biodiversité et diversité culturelle sont liées : la défense de la nature et la lutte des populations locales pour la reconnaissance de leur identité culturelle vont de pair. Faut-il même parler de nature ? « Votre nature, c'est notre culture », pourraient objecter les Maoris à ceux qui s'en tiennent à la protection d'une nature strictement séparée des hommes. Et ils pourraient ajouter : nous protégeons mieux notre fleuve comme culture que vous ne le faites comme nature.

Quel enseignement en tirer ? Le mouvement de défense des droits de la nature s'étend et s'internationalise. La Global Alliance for the Rights of Nature, notamment, qui regroupe de nombreuses organisations établies sur les cinq continents, cherche à construire une jurisprudence. Mais suffit-il d'attribuer des droits individuels à des entités naturelles pour les défendre contre les intérêts économiques ? Dans la zone culturelle occidentale, où la nature n'est guère reconnue comme sacrée, ce qui a le plus d'importance est la dimension collective des mobilisations en faveur des biens communs. En Europe, cette idée s'est développée depuis une dizaine d'années autour d'une remise en cause de la notion juridique de propriété : dans le droit civil, la propriété est un droit individualisé d'user et d'abuser. Or le rapport à l'environnement a une dimension collective : ce sont des collectifs (ou des communautés) qui font usage de la nature, et il est d'intérêt collectif de la protéger contre les dégradations. L'important, dans cette conception, n'est pas tant les qualités propres de l'entité naturelle à protéger que le fait de déclarer qu'il s'agit d'un bien commun : ce sont la communauté et les règles qu'elle se donne pour jouir de l'entité qui font de celle-ci un bien commun. Et dès lors, on dispose d'un cadre pour la protéger juridiquement sans avoir besoin de lui accorder une âme. ■

© Shutterstock.com/Gabor Kovacs Photography

LE FLEUVE WHANGANUI, en Nouvelle-Zélande, est devenu une personne juridique pour la justice locale, ce qui devrait faciliter sa protection. En accordant un droit au fleuve, la justice ne reconnaît pas seulement celui-ci, mais surtout les revendications des Maoris. Une piste à explorer pour mieux défendre la nature en Occident ?

L'AUTEURE

Catherine LARRÈRE, professeure émérite de philosophie à l'université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, est spécialiste de l'éthique environnementale.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

L'informatique va rompre le lien entre travail et revenu

Le remplacement de l'homme par la machine remet en question les fondements de la rémunération.

Depuis quelques années, les clients de certains supermarchés utilisent des caisses sans caissière ni caissier où ils scannent eux-mêmes le code-barres de leurs articles. Cependant, ces caisses automatiques sont peut-être déjà obsolètes. Dans un supermarché de Seattle, aux États-Unis, des capteurs et des caméras enregistrent en temps réel les produits mis dans les chariots par les clients qui, leurs achats terminés, quittent le magasin sans passer par une caisse d'aucune sorte.

Cette disparition des caisses et des caissiers est la dernière étape d'un long processus, avec d'abord l'introduction des caisses électriques qui font les additions à la place des caissiers, puis des codes-barres qui évitent de taper le prix de chaque article, puis des machines qui rendent la monnaie, etc. Chacune de ces transformations a permis aux caissiers de travailler plus vite et donc aux supermarchés d'en employer moins. La dernière étape supprimerait plus de 200 000 emplois en France, que ne compenseront pas les quelques milliers créés par les entreprises qui conçoivent ou fabriquent ces systèmes informatiques.

Comme je le soulignais dans le numéro de février 2015 de *Pour la Science*, il y a tout lieu de se réjouir de ce remplacement de l'homme par la machine, car le métier de caissier est l'un des plus répétitifs et des plus pénibles qui soient. Les caissières et les caissiers travaillent dans un environnement bruyant, souvent sans voir la lumière du jour et sans pouvoir se lever. Un grand nombre d'entre eux souffrent de troubles musculo-squelettiques : tendinites, mal de dos, etc. Qui souhaiterait que ses enfants travaillent toute leur vie à la caisse d'un supermarché ?

Plus fondamentalement, depuis l'aube de l'humanité, le progrès technique consiste à produire plus de richesses en travaillant moins, et non le contraire. Mais les caissiers libérés de leur tâche et devenus chômeurs, donc sans emploi et sans revenu, se réjouissent rarement. Pas plus d'ailleurs que ne se réjouissaient les mineurs, les ouvriers du textile, les postiers ou les disquaires qui les ont précédés. Une chose, cependant, a changé : cette question de la disparition du travail se trouve désormais au centre du débat public. La croissance du chômage n'est plus uniquement perçue comme un dysfonctionnement de notre économie, mais aussi comme un effet de ce remplacement de l'homme par la machine. Et si le phénomène persiste, il est certain que le chômage ne pourra pas être résorbé, qu'il n'y aura pas de travail pour tout le monde.

LES CAISSIERS SONT REMPLACÉS par des machines et perdent leur emploi. Faut-il aussi qu'ils perdent leur revenu ?

Alexis Sud © Shutterstock.com

Or il est temps de comprendre que ce que regrette surtout le caissier devenu chômeur n'est pas son travail passé, mais le revenu qu'il en tirait : il pourrait s'accommoder de son revenu sans son activité rémunératrice et occuper son temps à d'autres activités. Nous en venons donc à penser indépendamment l'idée de revenu et l'idée de travail, et à envisager de donner un revenu au caissier, qu'il travaille ou non.

Conditionner le revenu au travail incitait les femmes et les hommes à travailler dans les supermarchés et dans les usines, quand ce travail était nécessaire à la production de richesses. Mais maintenant que des machines remplacent partiellement ou totalement les humains et créent ces richesses à leur place, le travail n'est plus aussi utile, et marginaliser économiquement les oisifs pour les inciter à travailler n'a plus grand sens.

Proposé par certains économistes ou personnalités politiques, le « revenu universel » est aujourd'hui perçu comme une mesure sociale destinée à résoudre le « problème » du chômage. Ne devrions-nous pas plutôt le considérer comme la norme, dans une société informatisée ? Nous trouvons déjà normal de subvenir aux besoins des plus jeunes et des plus âgés, sans que ceux-ci aient besoin de travailler. Pourquoi devrait-il en être autrement avec ceux qui sont entre ces deux âges ? ■

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

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

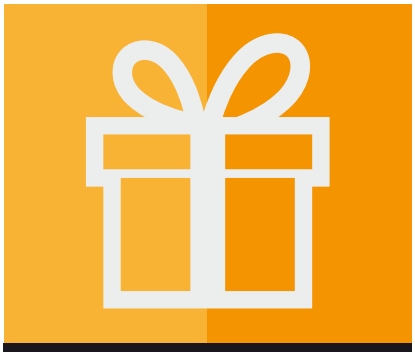
Le prix de la réciprocité

Un cadeau engage toujours son bénéficiaire d'une façon ou d'une autre. Une réciprocité qui serait profondément ancrée dans notre passé évolutif.

La campagne présidentielle qui s'achève en France a vu beaucoup de questions relatives à la moralité soulevées. Par exemple, est-il raisonnable pour un candidat à la plus haute fonction de la République d'accepter de se faire offrir de très onéreux costumes sur mesure ? Le bénéficiaire de ce cadeau a en partie lui-même répondu à cette question, puisqu'il a restitué ces vêtements en reconnaissant qu'il avait commis une erreur. On ne saura jamais si l'acceptation de ce cadeau était assortie de promesses faites à son auteur. Dans ce cas, évidemment, la violation de la conduite morale que l'on attend d'un politique eut été parfaitement établie. Dans le cas contraire, c'est-à-dire l'acceptation d'un cadeau sans engagement particulier, est-on bien certain que la situation n'est pas sans risque ? Chacun a bien compris que même si aucune promesse n'avait été faite, restait la question épineuse de la réciprocité. De quelle façon un présent nous engage-t-il ?

Sur le plan formel, rien ne nous contraint à devenir l'obligé de celui ou celle qui nous a fait un cadeau. Mais en pratique, cette relation n'établit-elle pas un système de contraintes implicites ? C'est précisément une question que s'est posée Robert Cialdini, psychologue à l'université de Columbia. Pour écrire son célèbre livre *Influence et manipulation* (*Influence, the Psychology of Persuasion*, 1984) le chercheur a étudié des résultats de la psychologie sociale de l'influence, mais il a aussi observé pendant plusieurs années les pratiques des vendeurs de voiture, de sociétés de télémarketing ou encore de militants d'associations caritatives. Son travail lui a permis de conclure qu'un cadeau entraîne mécaniquement une forme de réciprocité beaucoup plus contraignante qu'on ne pourrait le croire.

D'ailleurs, ces principes ont été appliqués de façon extensive dans le marketing. Qui n'a pas accepté de goûter dans un supermarché un nouveau jus de fruit ou un gâteau apéritif et acheté dans la foulée un produit dont il n'avait nullement besoin ? Les échantillons gratuits, les sourires, les compliments venant d'un inconnu dans la rue qui veut recueillir quelques oboles pour une cause ou une autre ou même encore un simple verre offert dans un bar induisent un système d'interactions subtiles qui peuvent nous conduire à accepter ce que nous n'aurions pas désiré faire quelques minutes auparavant.



QUAND UN PERSONNAGE PUBLIC accepte un cadeau de grande valeur, sa moralité peut être mise en question.

© Shutterstock.com/VirdaAr

Pourquoi ce principe de réciprocité est-il à ce point ancré en nous ? Certains en ont souligné le caractère universel, comme le sociologue américain Alvin Gouldner (même s'il insistait pour rappeler l'omniprésence de formes asymétriques de réciprocité), et la psychologie évolutionniste a proposé une interprétation intéressante (quoique spéculative) de la question.

Ainsi, le psychologue social américain Roy Baumeister voit dans la réciprocité une condition même de la survie de certaines espèces. En effet, a-t-il remarqué dans son livre *The Cultural Animal : Human Nature, Meaning and Social Life* (2005), les hasards de la chasse, par exemple, peuvent conduire un individu à abattre une proie qu'il ne pourra manger seul. Dans ces conditions, il est plus intéressant pour lui de partager en espérant que les bénéficiaires de ce don seront eux aussi généreux lorsqu'il connaîtra la faim.

Pour Roy Baumeister et les psychologues évolutionnistes, les groupes non dotés de cette aptitude à la réciprocité ont tout simplement moins de chances de survivre que les autres. Autrement dit, la réciprocité serait une sorte d'assurance contre la rareté des ressources lorsqu'une espèce est confrontée aux fluctuations de celles-ci. Dans ces conditions, on comprend dans quelle intimité de notre nature même, amplifiée par de nombreuses règles sociales, se loge le principe de réciprocité. On comprend aussi combien la décision qui prétend défendre l'intérêt général, comme c'est le cas de la gouvernance politique, doit se protéger de l'influence du principe de réciprocité. ■

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

cité des sciences & de l'industrie

TERRA DATA

NOS VIES À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE

EXPOSITION DU **04/04/17** AU **07/01/18**

AVEC LA PARTICIPATION DE

Inria · CNIL. COMMISSION NATIONALE INFORMATIQUE & LIBERTÉS · MAIF assureur militant · SAFRAN

AVEC LE SOUTIEN DE

Qwant

EN PARTENARIAT AVEC

20 minutes · Alternatives Economiques · Pour la Science · Le Huffington Post · MinuteBuzz · franceinfo:

TROUS NOIRS INTRIQUÉS

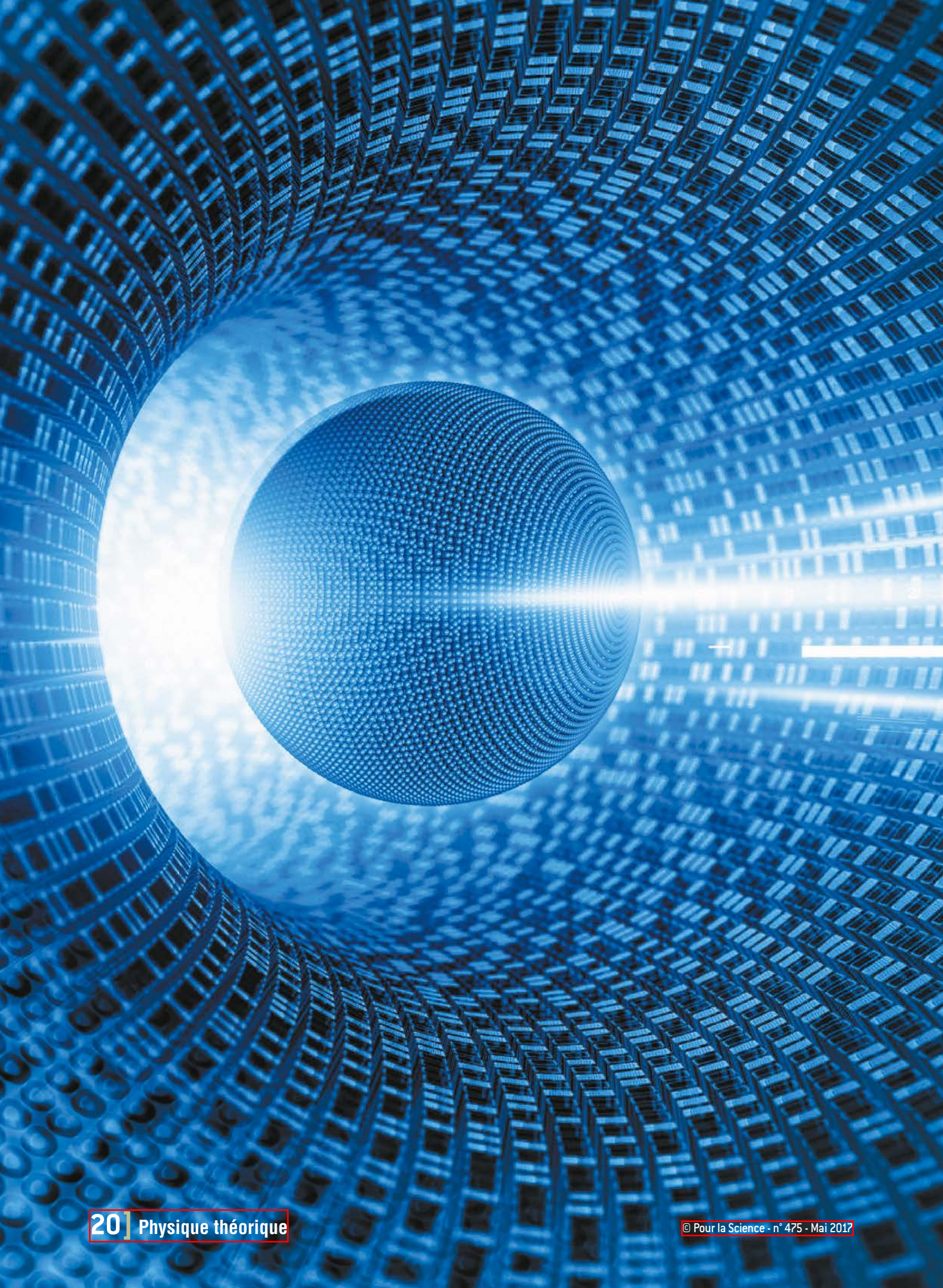
Une porte vers l'espace-temps quantique

Dans leur quête pour réconcilier les deux sœurs ennemies de la physique du XXe siècle – la physique quantique et la relativité générale – les théoriciens ont récemment formulé une hypothèse enthousiasmante !

Leur proposition ? L'espace-temps, décrit par la relativité générale, serait un phénomène émergent, qui prendrait racine dans des interactions quantiques d'objets plus fondamentaux. Mais que sont ces objets ? Comment exactement l'espace-temps naît-il de leurs interactions ? De nombreux physiciens s'associent dans un projet pluridisciplinaire pour comprendre les implications de cette fascinante hypothèse, avec l'espoir d'aboutir enfin à une théorie quantique de la gravitation et de l'espace-temps *(voir l'article de Clara Moskowitz, pages 20 à 26)*.

Dans ce contexte dynamique, des idées spectaculaires voient le jour. Ainsi, les travaux de Juan Maldacena et Leonard Susskind, des physiciens de premier plan, suggèrent une équivalence entre trou de ver et intrication quantique *(voir l'article de Juan Maldacena, pages 28 à 35)*. Pourtant, tout sépare ces deux phénomènes : les trous de ver relèvent de la relativité générale et décrivent des sortes de raccourcis liant deux régions éloignées de l'espace-temps, tandis que l'intrication de deux objets est un phénomène purement quantique, où les deux objets ont leurs propriétés fortement corrélées, indépendamment de la distance qui les sépare. Un pont très inattendu entre deux domaines, qui rapproche peut-être les physiciens de leur Graal. ■

Sean Bailly



© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

À la poursuite de l'espace-temps QUANTIQUE

Clara Moskowitz

L'espace et le temps émergeraient de l'intrication quantique de minuscules bribes d'information : telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé *It from Qubit*.

Kenn Brown, Mondolithic Studios

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Pour Shakespeare, « le monde entier est un théâtre ». Les physiciens partagent cette définition, mais pour eux, le théâtre est plus précisément l'espace. Celui-ci serait la scène sur laquelle entrent en action les forces et les particules qui l'occupent. L'espace, tel qu'on le conçoit généralement, n'est constitué de rien de matériel.

Cependant, les chercheurs commencent à mettre en doute cette vision. L'espace (ou plutôt l'espace-temps dans le contexte de la théorie de la relativité générale) pourrait être composé de minuscules bouts d'information. Selon cette approche, ces petits éléments, en interagissant, créent l'espace-temps et font émerger ses propriétés, telles que la courbure – dont découle la gravité.

Cette idée, si elle est correcte, n'expliquerait pas seulement l'origine de l'espace-temps. Elle aiderait aussi les physiciens à formuler la théorie quantique de la gravitation qui se fait attendre depuis si longtemps. En effet, les physiciens ont développé au XXe siècle deux théories irréconciliables, la relativité générale, qui décrit la dynamique de l'espace-temps, et la physique quantique, qui régit le monde des particules et de leurs interactions.

Le projet *It from Qubit* réunit plusieurs fois par an une centaine de physiciens pour réfléchir à ces nouvelles idées. Le nom de ce projet résume l'hypothèse qui anime ces chercheurs : le *it* est ici l'espace-temps et le *qubit* représente la plus petite quantité d'information – la version quantique du bit informatique.

L'idée que l'Univers serait construit à partir d'informations a été popularisée dans les années 1990 par le physicien américain John Wheeler et son expression « *It from Bit* ». Pour lui, toute la physique serait décrite au niveau le plus fondamental à partir d'information. Un quart de siècle plus tard, avec les progrès en physique quantique, le *bit* est devenu *qubit* et l'idée s'est modernisée.

La réunion *It from Qubit* (IfQ) qui s'est tenue en juillet 2016 à l'institut Perimeter de physique théorique, au Canada, illustre l'engouement autour de cet axe de recherche. Les organisateurs attendaient environ 90 personnes, mais ils ont reçu tellement de demandes qu'ils ont finalement accueilli 200 participants et ont animé, en simultané, six sessions parallèles dans d'autres universités. « Je pense que c'est l'une des voies les plus prometteuses, si ce n'est *la* voie, pour parvenir à la gravité quantique », confie Netta Engelhardt, postdoctorante à l'université Princeton et qui a assisté à plusieurs de ces réunions. « C'est vraiment en train de décoller. »

L'ESSENTIEL

- **L'espace-temps pourrait être constitué de minuscules éléments d'information liés par le phénomène d'intrication quantique.**
- **Des physiciens explorent cette idée dans le cadre d'un programme de recherche intitulé *It from Qubit*, qui réunit des spécialistes de l'informatique quantique et des physiciens de la relativité générale et de la théorie des cordes.**
- **L'objectif, à terme, est d'obtenir une théorie quantique de la gravitation, compatible avec la physique quantique et avec la relativité générale.**

Un pont entre plusieurs disciplines

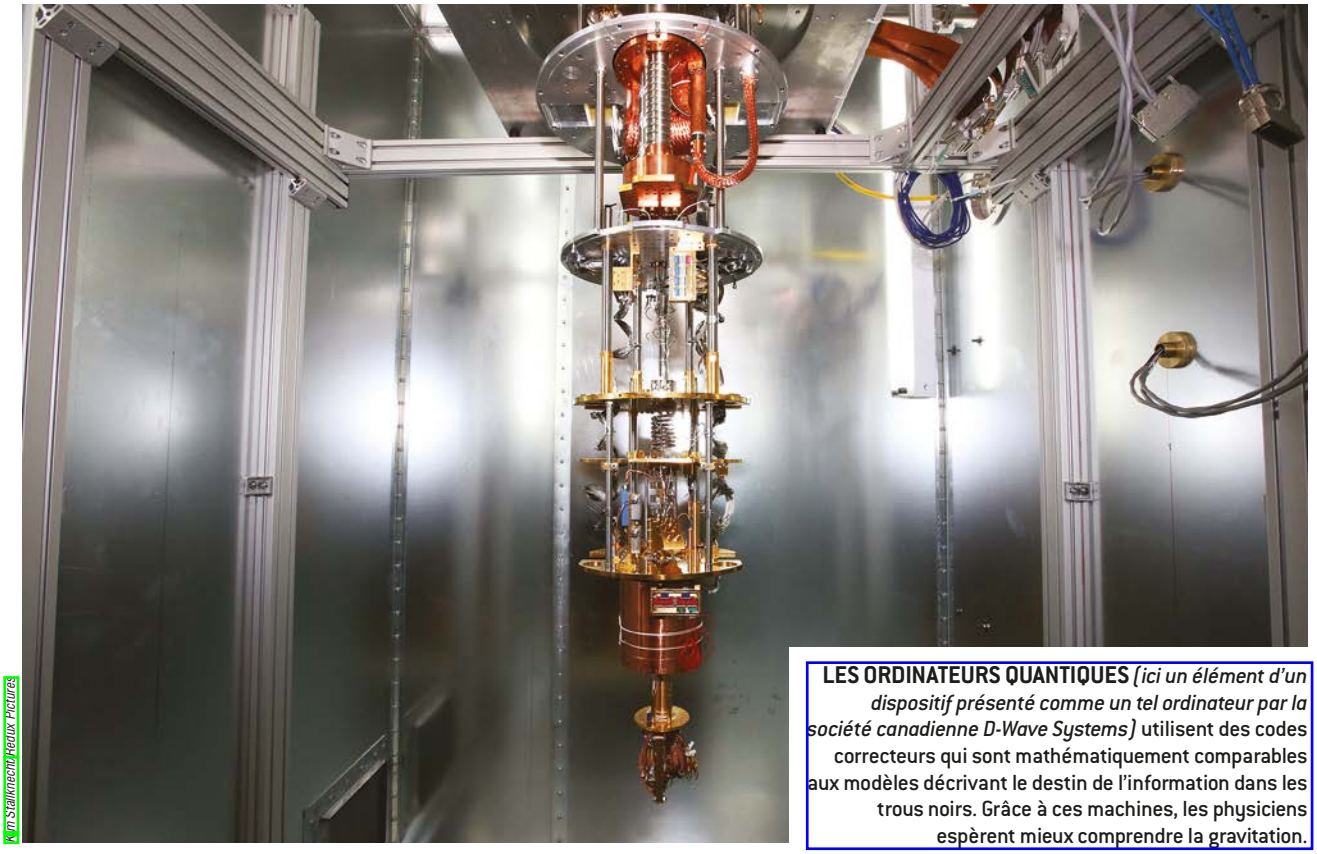
Parce que le projet concerne à la fois la science des ordinateurs quantiques, l'étude de l'espace-temps dans le cadre de la relativité générale, la physique des particules et la théorie des cordes, il réunit des chercheurs de communautés qui n'ont pas l'habitude de collaborer. Il y a plus d'un an, la fondation Simons, un organisme privé qui soutient la recherche scientifique, a décidé d'allouer un budget pour lancer le projet collaboratif *It from Qubit* et financer les recherches et les rencontres des physiciens sur ce sujet. Depuis, l'excitation n'a cessé de croître, et les rencontres successives ont attiré de plus en plus de chercheurs, parmi lesquels des membres de la collaboration financée par la fondation Simons mais aussi de nombreuses autres personnes simplement intéressées par le sujet.

L'intérêt pour le projet IfQ s'étend bien au-delà du cercle de chercheurs qui y participent. Par exemple, Brian Greene, théoricien des cordes à l'université Columbia et extérieur à IfQ, souligne que « si le lien avec la théorie de l'information quantique est aussi fructueux que certains l'anticipent, tout cela pourrait bien déboucher sur la prochaine révolution de notre compréhension de l'espace et du temps. C'est un projet important et tout à fait passionnant. »

L'idée selon laquelle l'espace-temps n'est pas fondamental, mais émerge de bits d'information et est « constitué » de quelque chose, marque une rupture par rapport au tableau dépeint par la relativité générale. De quoi exactement ces bits sont-ils faits et quel type d'information contiennent-ils ? Les chercheurs l'ignorent. Mais curieusement, cela ne semble pas les déranger. « Ce qui compte, ce sont les relations [entre les bits plus que les bits eux-mêmes] », explique Brian Swingle, postdoctorant à l'université Stanford. « Toute la richesse vient de ces relations collectives. Ici, l'élément crucial, ce n'est pas les constituants, mais la manière dont ils s'organisent. »

La clé de cette organisation pourrait être l'étrange phénomène que l'on

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



Jim Stalkhecht/Redux Pictures

LES ORDINATEURS QUANTIQUES *(ici un élément d'un dispositif présenté comme un tel ordinateur par la société canadienne D-Wave Systems)* utilisent des codes correcteurs qui sont mathématiquement comparables aux modèles décrivant le destin de l'information dans les trous noirs. Grâce à ces machines, les physiciens espèrent mieux comprendre la gravitation.

nomme intrication quantique : une corrélation bizarre qui peut exister entre deux particules, et grâce à laquelle des mesures réalisées sur l'une des particules ont un effet instantané sur l'autre, même quand une grande distance les sépare. « Selon une idée fascinante proposée récemment, l'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents d'espace-temps, quelle qu'en soit la nature », explique Vijay Balasubramanian, physicien à l'université de Pennsylvanie et l'un des principaux collaborateurs d'IfQ.

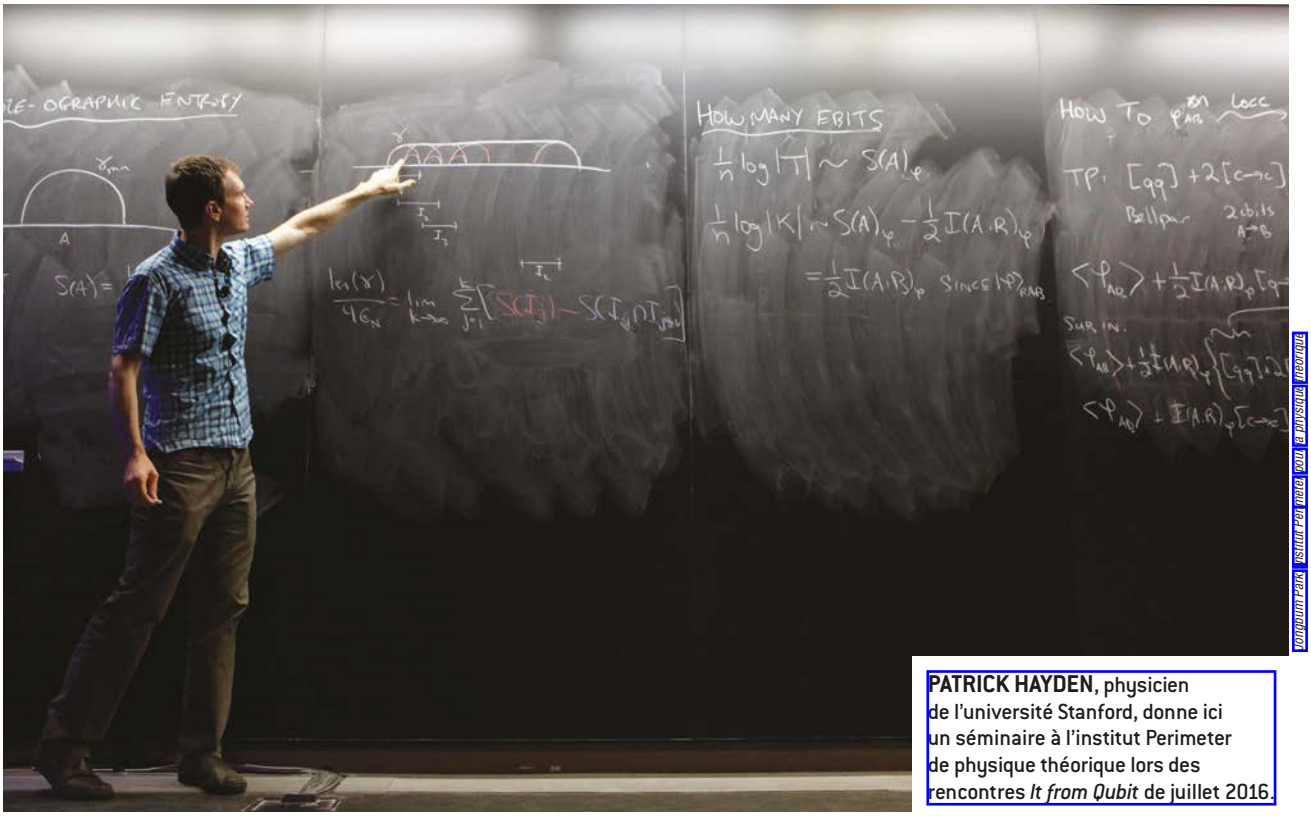
Le raisonnement qui sous-tend cette idée est le produit d'une série de découvertes réalisées par des physiciens, notamment par Shinsei Ryu, maintenant à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, et Tadashi Takayanagi, maintenant à l'université de Kyoto, au Japon. En 2006, ces deux chercheurs ont mis en évidence une connexion entre l'intrication quantique et la géométrie de l'espace-temps. En 2013, en s'appuyant sur ces travaux, Juan Maldacena, de l'Institut d'études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, à l'université Stanford, ont montré que si deux trous noirs étaient intriqués, ils créeraient un trou de ver, un raccourci dans l'espace-temps prédit par la relativité générale *(voir l'article de Juan Maldacena, pages 28 à 35)*. Cette idée a été surnommée ER = EPR, d'après les noms des physiciens qui ont suggéré ces phénomènes : Albert Einstein et Nathan Rosen pour les trous de ver, Einstein, Rosen et Boris Podolsky pour l'intrication quantique. Cette découverte, et d'autres comparables, suggèrent que, curieusement, l'intrication quantique (dont on pensait qu'elle ne faisait intervenir aucun lien physique) peut façonner l'espace-temps.

Afin de comprendre comment l'intrication pourrait donner lieu à l'espace-temps, les physiciens doivent d'abord mieux comprendre comment l'intrication fonctionne.

Ce phénomène nous paraît « fantomatique », pour reprendre les mots d'Einstein, lorsque lui et ses collaborateurs l'ont prédit en 1935, parce qu'il implique une connexion instantanée entre particules même très éloignées. Une situation qui semble défier la relativité restreinte qui stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière. L'intrication quantique a cependant été confirmée par de nombreuses expériences, sans pour autant violer les principes de la relativité restreinte.

L'AUTEURE

Clara MOSKOWITZ est rédactrice pour la revue *Scientific American* où elle couvre l'astrophysique, la cosmologie et la physique.



Longoum Pan, institut Perimeter, Waterloo

PATRICK HAYDEN, physicien de l'université Stanford, donne ici un séminaire à l'institut Perimeter de physique théorique lors des rencontres *It from Qubit* de juillet 2016.

Depuis peu, les physiciens considèrent qu'il existe plusieurs formes d'intrication. Dans la plus simple, plusieurs particules de même nature réparties dans l'espace sont reliées par une unique caractéristique (leur spin ou leur polarisation, par exemple). Mais, comme dit Vijay Balasubramanian, ce type d'intrication ne suffit pas pour reconstruire l'espace-temps. D'autres formes d'intrication seraient plus pertinentes. Par exemple, on peut imaginer des intrications entre particules de natures différentes. Les chercheurs explorent aussi la complexité déroutante de l'intrication d'un grand nombre de particules.

Une fois que les différents aspects de l'intrication seront mieux compris et maîtrisés, les chercheurs comprendront peut-être comment l'espace-temps émerge de ce phénomène. L'émergence est quelque chose que l'on retrouve par exemple en thermodynamique ou en météorologie, où les mouvements microscopiques des molécules de l'air donnent naissance à la pression et à d'autres grandeurs macroscopiques. « Ce sont là des phénomènes émergents », explique Netta Engelhardt. « Quand vous faites un zoom arrière sur quelque chose, vous voyez un tableau différent dont vous ne sauriez pas qu'il découle d'une dynamique à plus petite échelle. » De façon analogue, on voit l'espace-temps mais nous ne comprenons pas la dynamique quantique fondamentale à partir de laquelle il émerge.

Hologrammes cosmiques

À terme, l'objectif de tous ces travaux est d'enfin parvenir à une théorie qui décrit la gravité d'un point de vue quantique. Mais les physiciens qui se sont donné cette ambition se heurtent à un mur depuis un siècle. Les participants au projet *It from Qubit* misent sur l'idée du « principe holographique » pour réussir là où leurs prédécesseurs ont échoué.

Ce principe suggère que certaines théories physiques sont équivalentes à d'autres, plus simples, qui s'appliquent dans un univers de dimensionnalité inférieure. On retrouve cette idée avec les hologrammes : une carte postale en deux dimensions portant un hologramme de licorne peut contenir toute l'information nécessaire pour décrire et représenter la forme tridimensionnelle de la licorne. Dans cette logique, puisqu'il est si difficile de trouver une théorie satisfaisante de la gravité quantique, les physiciens tentent de trouver une théorie équivalente, plus maniable, valable dans un univers de dimensionnalité inférieure à la nôtre.

L'une des incarnations les plus réussies du principe holographique est la « correspondance AdS/CFT », sigles faisant référence à l'équivalence entre un modèle cosmologique dit univers anti-de Sitter (AdS) et un cas particulier de théorie quantique des champs, dite théorie conforme des champs (CFT pour *conformal field theory*), définie à la frontière de l'univers anti-de Sitter et dénuée de gravité. Par cette approche, il est possible de décrire complètement un trou noir à partir de ce qui se passe à la frontière de l'univers. Juan Maldacena a établi cette relation à la fin des années 1990, alors qu'il travaillait dans le cadre de la théorie des cordes. Dans cette dernière, les particules fondamentales, considérées jusque-là comme ponctuelles, sont remplacées par de minuscules cordes. L'objectif était de résoudre certains problèmes de calcul pour développer une description quantique de la gravitation.

Grâce à la correspondance AdS/CFT, les physiciens espèrent découvrir une théorie qui est équivalente à la gravitation quantique, tout en étant beaucoup plus

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

simple à manipuler – en laissant de côté la gravitation. « Il est très difficile d'obtenir des descriptions quantiques pour les théories avec gravitation, alors que celles sans gravitation sont beaucoup plus faciles à décrire complètement », insiste Vijay Balasubramanian.

Une théorie de la gravitation... sans gravitation

Mais comment une théorie laissant de côté la gravité pourrait-elle être légitime en tant que théorie quantique de la gravitation ? La réponse viendrait peut-être de la nature fondamentale de la gravitation. La gravité et l'espace-temps pourraient n'être que le produit final, en trois dimensions, de l'intrication des qubits dans un espace n'ayant seulement que deux dimensions.

Depuis une vingtaine d'années, les physiciens ont montré que la correspondance AdS/CFT fonctionne dans certaines situations, sans bien comprendre pourquoi. « Nous savons que ces deux théories sont duales [équivalentes], mais la raison pour laquelle la dualité fonctionne n'est pas claire », raconte Brian Swingle. « L'un des résultats qu'on espère [du projet IfQ] serait une théorie expliquant comment surgissent ces dualités. »

La théorie de l'information quantique pourrait aussi contribuer à ce projet grâce à un outil de cette discipline : les codes quantiques correcteurs d'erreurs. Les chercheurs en informatique quantique ont conçu ces codes pour aider à protéger l'information d'éventuelles pertes en cas d'interférences avec les intrications des qubits. Les ordinateurs quantiques, au lieu de coder l'information avec des bits uniques, utilisent des états hautement intriqués de multiples qubits. Le système reste ainsi robuste : une erreur unique ne peut pas affecter l'exactitude d'un élément d'information donné. Mais de façon surprenante, ces codes correcteurs pourraient jouer un rôle dans la correspondance AdS/CFT.

En effet, les mathématiques impliquées dans ces codes se retrouvent aussi dans cette dernière. Il semble que l'arrangement utilisé par les chercheurs pour intriquer de multiples bits et former des réseaux exempts d'erreurs soit aussi en jeu dans, par exemple, le codage de l'information de l'intérieur du trou noir que l'on retrouve à sa surface à travers l'intrication.

Même si les physiciens parviennent à comprendre comment fonctionne la correspondance AdS/CFT, et par là à concevoir une théorie de dimensionnalité inférieure qui se substitue à la gravité quantique, ils ne seront toutefois pas encore au bout de leurs peines. La correspondance elle-même ne fonctionne que dans une version simplifiée de l'Univers.

En particulier, toutes les lois de la gravitation qui s'appliquent à notre Univers n'interviennent pas dans le monde épuré de la correspondance. « La correspondance AdS/CFT possède une sorte de gravitation, mais ce n'est pas la théorie de la gravitation dans un univers en expansion comme celui où nous vivons », explique Brian Swingle. L'univers anti-de Sitter ne contient pas de matière, juste une constante cosmologique de valeur négative. Et, décrit d'une certaine façon, il est stable : ni en expansion ni en contraction *(voir l'encadré page 26)*. Si notre Univers contient aussi une constante cosmologique, elle doit être légèrement positive pour s'accorder aux observations sur l'expansion accélérée du cosmos. Néanmoins, ce modèle fournit aux physiciens un terrain de jeu théorique utile pour tester leurs idées, et appréhender plus simplement la gravitation quantique.

Si le projet IfQ repose sur des fondements irréalistes, font remarquer certains sceptiques, peut-il vraiment produire des résultats valables ? « C'est une critique légitime », concède Netta Engelhardt. « Pourquoi nous concentrons-nous sur ce modèle simplifié ? Tout cela dépend de la validité du modèle simplifié et de l'idée que, *in fine*, il est une version approchée, mais satisfaisante, de notre Univers. J'aimerais avoir la certitude que si nous comprenons le modèle simplifié, nous comprendrons la réalité. » Les participants du projet IfQ font le pari qu'en partant d'un tableau simplifié plus facile à manipuler, ils pourront à terme y greffer la complexité nécessaire pour appliquer la théorie au monde réel.

Malgré ces réserves, les physiciens affirment que l'approche vaut la peine d'être tentée. Elle a déjà ouvert de nouvelles pistes

« L'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents, quelle qu'en soit la nature »
Vijay Balasubramanian

de recherche intéressantes. « Je pense depuis longtemps que la relation entre l'information quantique et la gravitation quantique est d'une importance fondamentale », confie Raphael Bousso, physicien à l'université de Californie à Berkeley. « La connexion s'est approfondie au fil des ans, et je suis ravi de voir autant de chercheurs talentueux travailler ensemble pour s'atteler à ces questions et voir où elles nous mènent. »

Théoricienne à l'université Stanford, Eva Silverstein, qui elle non plus n'est pas membre du projet, est du même avis : « Il est clairement utile de développer l'information quantique et de l'appliquer à ces problèmes. Mais pour comprendre la dynamique [de la gravitation quantique], il faut encore d'autres éléments, et il est important que la discipline ne se concentre pas trop sur une approche unique. »

Un projet qui portera des fruits

De plus, même si le projet n'aboutit pas au développement d'une théorie quantique de la gravitation, il aura vraisemblablement des retombées fructueuses. L'application de techniques et d'idées inspirées de la théorie des cordes et de la relativité générale à des questions d'information quantique aidera, par exemple, à mieux définir les différents types d'intrication quantique, à la fois pour comprendre l'espace-temps et pour construire des ordinateurs quantiques.

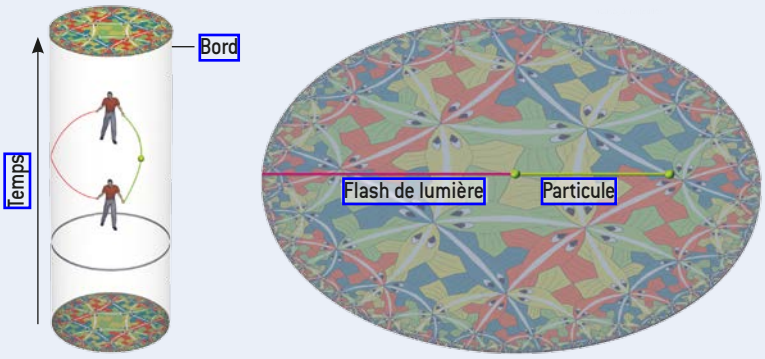
« Quand vous commencez à jouer avec ces outils dans un cadre différent, il y a de bonnes chances que cela mène à de nouvelles idées qui sont intéressantes et qui pourraient être utiles dans d'autres domaines », s'enthousiasme Dorit Aharonov, spécialiste en informatique quantique à l'université hébraïque de Jérusalem et participante au projet IfQ. « Il semble que l'on soit en train de progresser sur des questions posées depuis de nombreuses années, ce qui est passionnant. » Par exemple, des chercheurs ont trouvé qu'il serait possible de mesurer le temps à l'intérieur d'un trou de ver en le représentant comme un circuit quantique, que l'utilisation de la théorie des cordes et de l'intrication permet de définir certaines phases de la matière condensée, etc.

En outre, combiner information quantique et théorie des cordes aiderait aussi à évaluer les théories que les chercheurs proposeront. On peut se représenter n'importe quelle théorie physique comme un ordinateur, ses entrées et ses sorties étant l'équivalent d'un état initial et d'un état ultérieur, mesurable, décrits par la théorie. Lorsque les chercheurs proposeront une théorie candidate pour la gravitation quantique, ils pourront la tester avec cette analogie et se demander quelle est la puissance de calcul de la théorie. « Si cette puissance est trop grande, si notre modèle de gravitation quantique était capable de calculer des choses dont nous pensons qu'elles ne peuvent pas être calculées dans notre monde, cette théorie susciterait un doute », explique Dorit Aharonov. « C'est un moyen de dire, par une approche différente, si la théorie tient la route ou non. »

Le projet *It from Qubit* rappelle à certains physiciens une autre époque grisante où de grandes idées voyaient le jour. « J'ai commencé ma thèse en 1984, au moment de la révolution de la première théorie des cordes », dit Hirosi Ooguri, physicien à Caltech, l'institut de technologie de Californie. « C'était une période très enthousiasmante, où la théorie des cordes émergeait en tant que principale candidate pour une théorie unifiée de toutes les forces de la nature. Je vois d'un même œil l'actuelle explosion d'intérêt autour de ces idées. C'est clairement une époque passionnante pour les jeunes de la discipline comme pour ceux d'entre nous qui ont obtenu leur thèse de doctorat il y a plusieurs décennies. » ■

Un univers-jouet à courbure négative

Un univers anti-de Sitter est un monde dont l'espace-temps est à courbure négative, ou hyperbolique. Dans le cas de deux dimensions d'espace, on peut le représenter par un disque de Poincaré (*à droite*). En y ajoutant le temps (axe vertical, *à gauche*), on obtient un cylindre plein dont chaque section est un espace hyperbolique. Cet univers possède une certaine forme de gravitation. Une particule lancée du centre y retourne en un temps fini. Un rayon de lumière ira jusqu'au bord de l'espace avant de revenir dans le même temps. La description de cet univers est équivalente à une théorie des champs dite conforme définie sur l'enveloppe du cylindre. Elle comporte une dimension spatiale de moins et est dénuée de gravitation, ce qui facilite les calculs.



© Kawanami-Yun, Universita Vita, Anesoul

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Binétruy, **Au-delà de la relativité générale : « une théorie quantique de la gravitation est nécessaire »**, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

J. Maldacena, **La gravité est-elle une illusion ?**, *Dossier Pour la Science*, n° 83, avril-juin 2014.

S. Sachdev, **Métaux étranges et théorie des cordes**, *Pour la Science*, n° 429, juillet 2013.

J. Maldacena, **The large-N limit of superconformal field theories and supergravity**, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 38(4), pp. 1113-1133, 1999.

Site internet du projet *It from Qubit* : http://bit.ly/PLS475 IfQ

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Dès le prochain numéro, retrouvez la

nouvelle formule de Pour la Science

- Davantage d'actualités
- De nouvelles rubriques
- Un graphisme plus contemporain

- Et toujours des articles rédigés par les meilleurs spécialistes du domaine pour un plaisir de lecture renouvelé

L'AVENTURE DES SCIENCES CONTINUE !

Rendez-vous le 24 mai 2017 chez votre marchand de journaux

Disponible également sur pourlascience.fr

L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?

Juan Maldacena

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Réconcilier enfin relativité générale et physique quantique ? Un rêve de physiciens qui prendrait corps avec une nouvelle théorie : l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver reliant les deux astres.

La physique théorique regorge de notions étonnantes, mais deux des plus étranges sont certainement l'intrication quantique et les trous de ver. La première est un phénomène purement quantique, dans lequel deux objets (en général des particules subatomiques) ont des propriétés directement corrélées même si de grandes distances les séparent et qu'aucun lien physique ne semble exister entre eux. Quant aux trous de ver, prédits par la théorie de la relativité générale, ce sont des raccourcis qui connecteraient des régions éloignées de l'espace-temps, par exemple deux trous noirs distants. Ces dernières années, avec plusieurs autres physiciens, j'ai suggéré que ces deux concepts *a priori* si différents sont peut-être liés. À partir de calculs portant sur des trous noirs, nous nous sommes rendu compte que l'intrication de la physique quantique et les trous de ver de la relativité générale pourraient constituer deux facettes d'un même phénomène. Et nous pensons que cette similitude s'étend à des situations qui ne se limitent pas aux trous noirs.

Nous n'en sommes qu'aux prémices de cette idée, mais si elle se confirme, elle aura des conséquences profondes sur notre compréhension du monde. En effet, elle suggère par exemple que l'espace-temps lui-même émergerait de l'intrication de constituants microscopiques plus fondamentaux. Elle laisse aussi penser que la relation entre objets intriqués (et qui ont longtemps été considérés comme n'ayant pas de lien physique entre eux) serait moins « magique » qu'elle n'apparaît.

Malcolm Godwin, Moonrunner Design

DEUX TROUS NOIRS, situés à grande distance l'un de l'autre, pourraient être reliés par un trou de ver, d'après les équations de la relativité générale. En s'inspirant de certains résultats de la théorie des cordes, des physiciens pensent que les trous de ver et l'intrication quantique sont deux aspects d'un même phénomène.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

L'AUTEUR

Juan MALDACENA est physicien théoricien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis. Il est connu pour ses contributions à l'étude de la gravitation quantique et de la théorie des cordes.

L'ESSENTIEL

- La physique quantique permet l'intrication d'objets éloignés, les mesures réalisées sur l'un affectant celles sur l'autre, même s'il n'y a pas de lien physique entre eux.
- Les équations de la relativité générale, qui décrivent la géométrie de l'espace-temps, autorisent l'existence de trous de ver, des raccourcis entre des régions éloignées.
- Les deux phénomènes pourraient être équivalents. Cette équivalence fournirait une piste pour élaborer une description quantique de l'espace-temps.

Une compréhension approfondie de cette relation entre intrication et trous de ver aboutira peut-être à une piste pour unifier la physique quantique et la relativité générale et ainsi pour développer une théorie quantique de la gravitation. En effet, à ce jour, la physique quantique, qui décrit notamment les interactions subatomiques, et la relativité générale, qui rend compte de la dynamique de l'espace-temps et de la gravitation, sont incompatibles. Or une théorie quantique de la gravitation est nécessaire pour explorer les instants les plus reculés de l'histoire de l'Univers et l'intérieur des trous noirs.

De façon étonnante, les idées d'intrication quantique et de trous de ver remontent toutes deux à des articles écrits en 1935 par Albert Einstein et ses collaborateurs. Ces articles traitent de phénomènes très différents, et Einstein n'a probablement jamais imaginé qu'il pourrait y avoir entre eux un rapport. Et ce d'autant plus que, pour le célèbre physicien, l'intrication quantique traduisait l'existence de problèmes fondamentaux au cœur de la théorie quantique. L'ironie est grande: ce phénomène pourrait aujourd'hui ouvrir une voie pour concilier la théorie de la relativité générale, développée par Einstein en 1915, et la physique quantique.

Des trous noirs aux trous de ver

Afin d'expliquer pourquoi l'intrication quantique et les trous de ver pourraient être apparentés, penchons-nous d'abord sur certaines propriétés des trous noirs. Ces objets de l'extrême sont décrits dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Celle-ci montre comment la matière et l'énergie déforment l'espace-temps et que la force gravitationnelle est une manifestation de la courbure de ce dernier.

Dans la plupart des situations, la courbure de l'espace-temps est très faible. Mais elle devient extrême dans les trous noirs. On distingue alors deux régions: l'intérieur du trou noir, d'où même des objets se déplaçant à la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 kilomètres par seconde) ne peuvent s'échapper, et son extérieur, où l'espace-temps est courbé mais d'où les objets et l'information peuvent encore s'échapper. On nomme « horizon des événements » la frontière séparant ces deux régions. D'après la relativité générale, cet horizon n'est qu'une surface immatérielle: un astronaute qui le traverserait ne ressentirait rien de particulier. Mais une fois qu'il l'aura franchi, le voyageur de l'espace ne pourra plus s'échapper. Il sera condamné à atteindre la région du trou noir où la courbure devient infinie selon la physique non quantique, nommée la singularité interne.

En 1916, soit un an seulement après l'introduction de la relativité générale par Einstein, le physicien allemand Karl Schwarzschild trouva la solution la plus simple des équations d'Einstein décrivant ce qu'on nommera plus tard un trou noir. Cependant, la géométrie de l'espace-temps correspondant à la solution de Schwarzschild – et à la plupart des autres solutions aux équations d'Einstein – était difficile à interpréter jusque dans ses plus subtiles conséquences. En effet, les physiciens maîtrisaient peu à l'époque les mathématiques associées à la géométrie différentielle et à l'invariance sous les changements de coordonnées, qui sont nécessaires pour décrire ce qui se passe au voisinage d'un trou noir.

En 1935, Einstein et son collègue Nathan Rosen, alors à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, découvraient la possibilité qu'existent des trous de ver – on parle aussi de ponts d'Einstein-Rosen (ou ponts ER). Les deux physiciens n'en saisissaient pas toute la géométrie. Il fallut attendre les années 1960 pour que les chercheurs commencent à comprendre le sens de la solution de Schwarzschild et comment un trou de ver y relie en quelque sorte deux trous noirs. Vus de l'extérieur, les deux astres se présentent comme des entités distinctes situées dans des régions différentes de l'espace-temps, mais, d'après les équations, les trous noirs partagent le même intérieur.

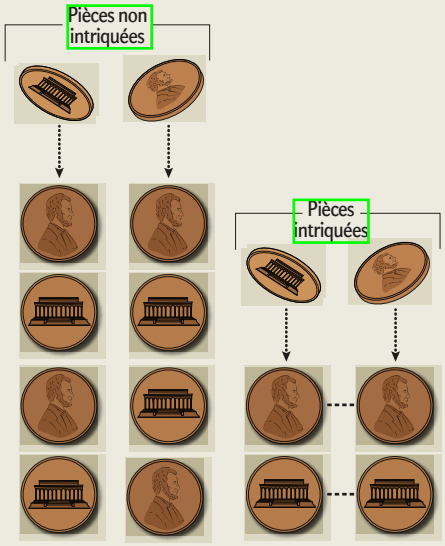
Le trou de ver de la solution de Schwarzschild diffère *a priori* des trous noirs qui se forment dans le cosmos suite à l'effondrement d'étoiles massives en cela qu'il ne contient pas de matière, mais uniquement de l'espace-temps courbe. En outre, un trou noir né d'une étoile n'a qu'un seul extérieur, alors que ce trou de ver en a deux. La plupart des chercheurs considèrent la solution de Schwarzschild présentant deux extérieurs comme une curiosité mathématique sans pertinence pour le monde réel. Les physiciens théoriciens se sont néanmoins interrogés sur son interprétation physique.

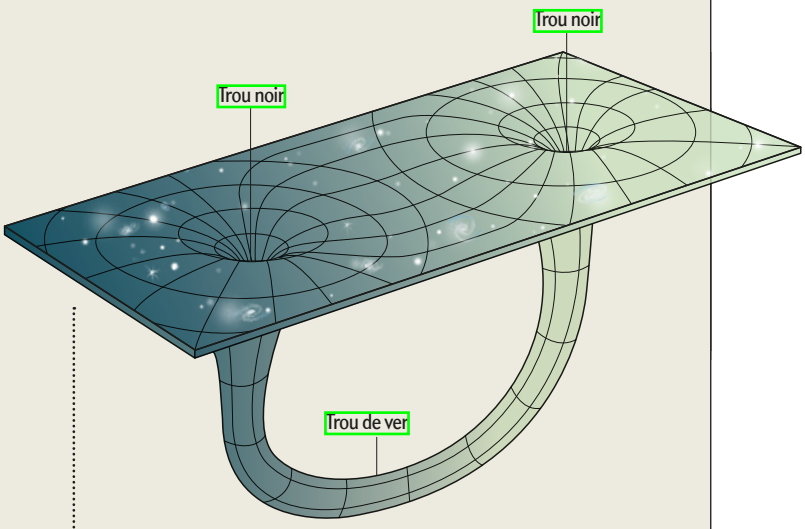
En 1962, les physiciens américains John Wheeler et Robert Fuller ont montré que le trou de ver reliant les extérieurs des deux trous noirs est instable. Il s'allonge et s'affine à mesure que le temps passe, comme de la

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

QUAND L'INTRICATION QUANTIQUE RENCONTRE LES TROUS DE VER

L'intrication est un concept de la physique quantique qui décrit un type particulier de corrélations entre les propriétés de deux objets, quelle que soit la distance qui les sépare. Les trous de ver, prédits par la relativité générale, sont des ponts spatiotemporels pouvant relier des régions éloignées, dans certains cas deux trous noirs. Certains physiciens émettent l'hypothèse que ces deux phénomènes, apparemment sans rapport, sont fondamentalement liés.





INTRICATION QUANTIQUE

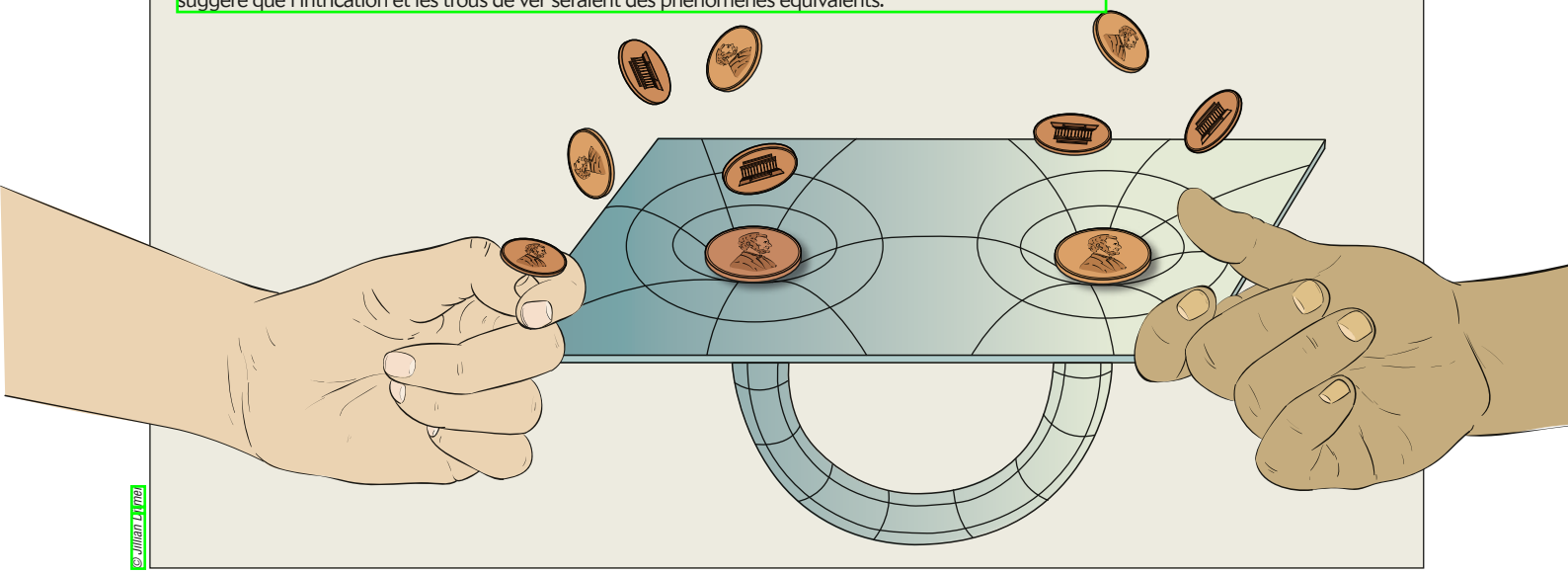
Quand on lance deux pièces quelconques, le résultat du tirage de l'une n'influe pas sur celui de l'autre – n'importe laquelle des quatre combinaisons se produira *(à gauche)*. Mais si les deux pièces sont intriquées, alors le résultat du lancer de la première détermine celui du lancer de la seconde. Si la première tombe sur pile, par exemple, la seconde tombera également sur pile, et si la première donne face, la seconde donnera face aussi *(à droite)*.

TROUS DE VER

Les équations de la relativité générale suggèrent qu'un trou de ver peut connecter deux trous noirs, même très distants l'un de l'autre, pour créer un pont dans l'espace-temps. À un observateur extérieur, les trous noirs donneraient l'impression de constituer des entités séparées, mais ils seraient reliés par un intérieur partagé. Cependant, aucune personne ni signal ne pourraient voyager à travers.

UN SEUL ET MÊME PHÉNOMÈNE ?

Si deux trous noirs venaient à être intriqués, tous les éléments microscopiques à l'intérieur du premier trou noir seraient corrélés avec ceux du second. Dans cette situation, il semble que les trous noirs formeraient un espace-temps qui présente un trou de ver reliant les intérieurs des deux astres. Cette découverte suggère que l'intrication et les trous de ver seraient des phénomènes équivalents.



© Jillian Lyme

LE TROU NOIR AU CENTRE DE LA VOIE LACTÉE, Sagittarius A*, est visible de façon indirecte grâce au rayonnement émis par la matière qui s'échauffe en tombant dedans *(en bleu)*, et observé par le télescope *Chandra*. Est-il relié à une autre région de l'Univers par un trou de ver ?

© NASA/CXC/Caltech/M. Muno et al.

pâte à pain que l'on étirerait. Les horizons des trous noirs finissent alors par se séparer. En fait, ils s'écartent tellement vite qu'il est impossible d'utiliser un trou de ver de ce type pour voyager d'un extérieur à l'autre. Dit autrement, le pont s'écroule avant que nous puissions le traverser.

Les trous de ver à la Einstein-Rosen diffèrent donc en partie de ceux que l'on rencontre parfois dans la science-fiction, comme dans le film *Interstellar* de Christopher Nolan, car ils ne sont pas « traversables ». S'ils ne sont pas qu'une curiosité mathématique, on pourrait néanmoins les inclure dans le scénario d'une œuvre de science-fiction de la façon suivante : pour séparer Roméo et Juliette, les familles des deux amants les envoient dans deux galaxies éloignées, en leur interdisant de voyager. Mais les tourtereaux, très doués en physique, réussissent à se construire un trou de ver. De l'extérieur, le trou de ver semble n'être qu'une paire de trous noirs, l'un dans la galaxie de Roméo, l'autre dans celle de Juliette. Les amants se jettent alors à l'intérieur de leur trou noir respectif. Aux yeux de leurs familles, ils se sont simplement suicidés et on n'a jamais plus entendu parler d'eux. Mais la géométrie du trou de ver est telle que Roméo et Juliette se sont en réalité retrouvés dans l'intérieur partagé, à l'insu du monde extérieur ! Et ils y vivent heureux ensemble pendant un petit moment, avant que le pont ne s'écroule, détruisant l'intérieur et les tuant tous les deux.

Intrication : d'étonnantes corrélations

L'article de 1935 discutant de l'autre phénomène qui nous intéresse, l'intrication quantique, a été écrit par Einstein, Rosen et Boris Podolsky (alors également à l'Institut d'études avancées). Le trio est généralement désigné par ses initiales, EPR. Dans cet article, les trois physiciens tentaient de mettre au jour un problème de la théorie quantique en exposant un phénomène qui semblait violer le principe relativiste selon lequel aucune particule ou information ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière. Or dans le phénomène présenté par le trio EPR et qu'on nommera plus tard « intrication », deux objets physiques présentent d'étranges corrélations, même s'ils sont distants au point qu'aucun signal physique n'a le temps de se propager de l'un à l'autre au cours de la durée qui sépare les mesures effectuées sur chacun d'entre eux.

Des corrélations, il en existe aussi en physique classique. Imaginez par exemple que vous quittiez la maison muni d'un seul gant parce que vous avez oublié l'autre chez vous. Avant de fouiller votre poche, vous ne savez pas si vous avez emporté le gant gauche ou le droit. Mais une fois que vous avez vu que c'est le gant droit, vous savez immédiatement que c'est le gauche qui est resté à la maison.

Cependant, l'intrication quantique est bien plus intéressante et intrigante. Considérons par exemple les corrélations portant sur la polarisation des photons qui, lorsqu'on la mesure, est soit « horizontale », soit « verticale ». De façon générale, l'état de polarisation d'un photon est, sur le plan mathématique, une combinaison linéaire (une somme pondérée) de ces deux états observables de base. Mais quand on mesure la polarisation, cette superposition d'états disparaît : l'orientation mesurée est soit verticale, avec une certaine probabilité (qui dépend de l'état initial), soit horizontale, avec la probabilité complémentaire.

Maintenant, il est possible de préparer une paire de photons A et B dans un état quantique particulier, dit intriqué, où la polarisation mesurée pour l'un des photons, que le résultat soit « verticale » ou « horizontale », est toujours orthogonale à celle mesurée pour l'autre photon. Le système global a ici un état bien défini (on sait qu'il contient deux photons de polarisations orthogonales), mais on ne peut rien dire sur ceux des particules individuelles avant d'effectuer la mesure.

Une expérience consisterait à produire des paires de photons intriqués A et B qui partent dans des directions opposées et s'éloignent. Supposons qu'à un instant donné, on mesure la polarisation de A ; si le résultat est « verticale », une mesure de la polarisation de B donnera à coup sûr « horizontale », même si aucun signal physique n'a pu aller d'un photon à l'autre dans le laps de temps qui sépare les deux mesures. Ainsi, les deux particules semblent communiquer au moment de la mesure pour s'accorder instantanément sur leurs polarisations respectives, en violation des lois de la relativité. C'est le fameux paradoxe EPR.

Pour le résoudre, Einstein, Podolsky et Rosen suggéraient que la formulation de la théorie quantique était incomplète et qu'il existait des variables cachées donnant cette impression de communication sans lien physique entre les deux photons. Le physicien danois Niels Bohr a répondu à

cette critique en soulignant que le paradoxe apparent réside dans l'attachement d'Einstein au principe de localité. Selon Bohr, l'intrication est un phénomène non local : les deux particules forment un système lié indépendamment de la distance qui semble séparer ses entités.

Le défi était donc de vérifier qui, d'Einstein ou de Bohr, avait raison. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a obtenu un système d'inégalités portant sur les corrélations entre les particules et que l'on pouvait tester expérimentalement : si ces inégalités sont satisfaites, c'est qu'il existe des variables cachées ; à l'inverse, si elles sont violées, c'est que l'intrication quantique est bien un phénomène non local.

Une telle expérience a été difficile à mettre en place, mais en 1980, Alain Aspect et ses collègues, en France, ont réussi à montrer de façon convaincante que les inégalités de Bell sont violées. Et d'autres expériences ont suivi afin de vérifier de façon toujours plus rigoureuse la nature non locale de l'intrication quantique *(voir la figure pages 34-35)*.

L'intrication pourrait sembler n'être qu'une propriété ésotérique des systèmes quantiques. Pourtant, au cours des deux dernières décennies, ces corrélations quantiques ont conduit à des applications et percées dans des domaines tels que la cryptographie et l'informatique quantique.

Jusqu'à présent, nous avons décrit dans les grandes lignes les trous de ver et l'intrication quantique. Comment ces deux phénomènes si différents peuvent-ils être reliés ? Une réponse s'est profilée en étudiant d'un peu plus près les trous noirs. En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement similaire à celui d'un objet chaud.

Le physicien anglais s'est intéressé à un phénomène quantique qui se déroule en permanence. L'espace sans matière est loin d'être vide : des paires particule-antiparticule y naissent spontanément, et disparaissent tout aussi vite en s'annihilant. Stephen Hawking a considéré des paires qui se forment juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir. Il peut arriver qu'une des particules d'une paire tombe dans le trou noir et que l'autre s'échappe loin de l'astre. Pour un observateur distant, le trou noir semble alors rayonner à la manière d'un corps chaud, si bien que ce phénomène implique aussi que le trou noir a une température.

Or depuis le XIXe siècle, les physiciens ont compris que la température d'un système résulte des mouvements erratiques de ses constituants microscopiques. Dans un gaz, par exemple, la température est liée à l'agitation des molécules. Par conséquent, si les trous noirs ont une température, on peut s'attendre à ce qu'ils renferment eux aussi des constituants microscopiques collectivement capables d'adopter différentes configurations, que l'on nomme micro-états, dont certaines correspondraient au même état macroscopique du trou noir.

ER = EPR

Les trous de ver, ou ponts ER, et l'intrication quantique en jeu dans le paradoxe EPR pourraient être deux aspects d'un même phénomène

Les travaux de Stephen Hawking ont conduit les physiciens à considérer que, au moins vus de l'extérieur, les trous noirs devraient se comporter comme des systèmes quantiques. Ils devraient donc être soumis à toutes les lois quantiques. Pour résumer, quand nous regardons un trou noir macroscopique de l'extérieur, nous devrions observer un système qui a de nombreux micro-états possibles, chacun ayant la même probabilité d'être réalisé.

Puisque, vus de l'extérieur, les trous noirs ressemblent à des systèmes quantiques ordinaires, rien ne nous empêche (en théorie) de considérer deux trous noirs intriqués et très distants l'un de l'autre. Chacun a un grand nombre de micro-états quantiques possibles. Et l'on peut imaginer une intrication telle que chaque micro-état quantique du premier trou noir est corrélé avec le micro-état correspondant du second. En particulier, si l'on mesure un certain état pour le premier trou noir, l'autre trou noir devra être exactement dans le même état.

L'histoire devient alors fascinante. En s'appuyant sur certaines considérations inspirées de la théorie des cordes (qui est l'une des pistes les plus explorées pour parvenir à une théorie quantique de la gravitation), nous avons suggéré qu'une paire de trous noirs aux micro-états ainsi intriqués (ce qu'on pourrait nommer un état d'intrication EPR) produirait un espace-temps dans lequel un trou de ver (un pont ER) relierait l'intérieur des deux trous noirs. En d'autres termes, l'intrication quantique crée une connexion géométrique entre les deux trous noirs. C'est étonnant, car on pensait que l'intrication implique des corrélations sans liens physiques ; or ici, les deux trous noirs distants sont physiquement connectés par leur intérieur grâce au trou de ver.

Leonard Susskind, de l'université Stanford, et moi avons noté « ER = EPR » cette équivalence des trous de ver et de l'intrication. Du point de vue d'EPR, les observations près de l'horizon de chaque trou noir sont corrélées parce que les trous noirs sont dans un état quantique intriqué. Et dans la perspective ER, les observations sont corrélées parce que les deux systèmes sont liés par le trou de ver.

Pour en revenir à Roméo et Juliette, nous sommes maintenant en mesure d'imaginer comment ces amants pourraient créer le trou de ver destiné à les réunir. Tout d'abord, ils doivent produire de nombreuses paires de particules intriquées, semblables à celles examinées plus haut, Roméo possédant un membre de chaque paire intriquée et Juliette l'autre. Il leur faut ensuite construire des ordinateurs quantiques très complexes qui manipuleront leurs particules quantiques respectives et les combineront de façon contrôlée pour créer une paire de trous noirs intriqués. Un tel exploit serait extrêmement difficile à réaliser en pratique. En effet, à la moindre interaction, les particules perdent leurs propriétés d'intrication. Mais l'opération n'est pas interdite par les lois de la physique. Et n'avons-nous pas dit que Roméo et Juliette étaient très intelligents ?

Notre idée s'appuie sur de nombreux travaux réalisés ces dernières décennies. Citons notamment un article publié en 1976 par Werner Israel, alors à l'université de l'Alberta, au Canada, sur la thermodynamique des trous noirs. En 2006, Shinsei Ryu et Tadashi Takayanagi, à l'université de Californie à Santa Barbara, ont étudié la relation entre l'intrication et la géométrie de l'espace-temps. Mais c'est surtout un article récent d'Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski et James Sully, tous alors à l'université de Californie à Santa Barbara, qui nous a incités à regarder de plus près le lien entre intrication quantique et trous de ver. Ces chercheurs ont réexaminé ce que nous savions des trous noirs. Et ils ont mis au jour un paradoxe.

Les trous noirs brûlent-ils ?

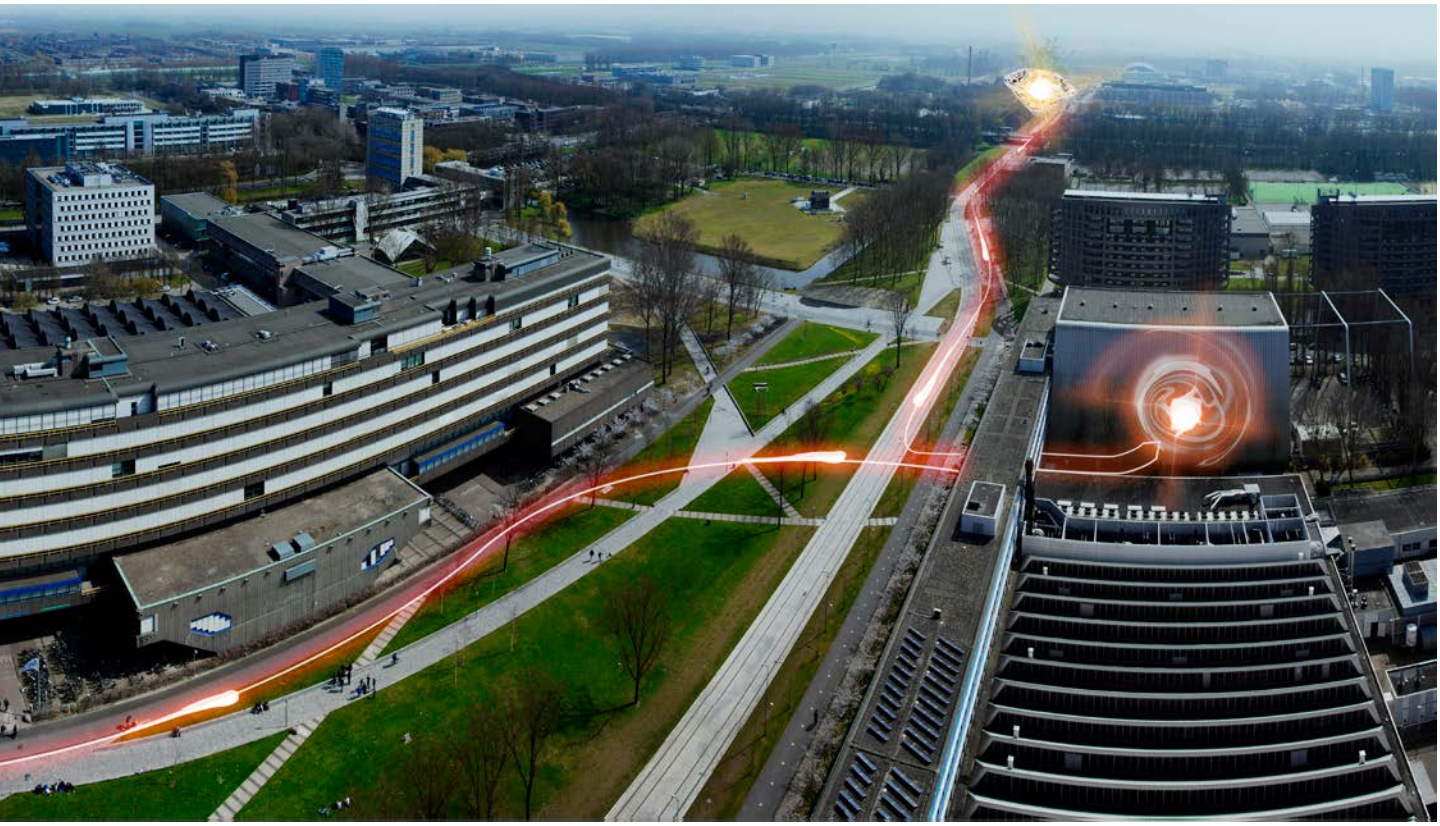
Une question majeure concernant les trous noirs est celle de la perte d'information. En effet, toute information qui traverse l'horizon des événements d'un trou noir ne peut en ressortir. *A priori*, cette information ne serait pas réellement perdue, mais juste hors de portée, pour nous autres à l'extérieur du trou noir. Mais avec les travaux de Stephen Hawking, le sort de l'information est devenu moins trivial. Pour un observateur distant, un trou noir qui rayonne perd de la masse. Il s'évapore jusqu'à disparaître complètement. Que devient l'information (que le rayonnement de Hawking ne peut transporter, en raison de sa nature aléatoire) ? Les physiciens en débattent encore car, en physique quantique, un principe fondamental impose la conservation de l'information.

Les trous noirs violent-ils ce principe ? Pas nécessairement. En 1997, j'ai apporté un élément de réponse en développant le principe holographique. Ce modèle établit une équivalence mathématique entre un univers tridimensionnel régi par la gravitation (qui peut donc contenir des trous noirs) et un univers bidimensionnel dépourvu de gravitation, qui borde l'espace tridimensionnel. Ainsi, la description de l'évolution d'un trou noir en trois dimensions, où le problème de la conservation de l'information se pose, peut être réalisée à l'aide de champs vivants dans un espace à deux dimensions, où le problème ne se pose pas car, sans gravitation, il n'y a pas de trous noirs ! En conséquence, puisque l'information est préservée dans l'univers 2D, elle l'est nécessairement dans l'univers 3D.

Cependant, cela n'explique pas ce que devient l'information. Dans les années 1990, Leonard Susskind a montré que le rayonnement de Hawking peut porter l'information s'il constitue un système de particules intriquées entre elles. Mais un nouveau problème surgissait : chaque particule du rayonnement de Hawking est *a priori* corrélée à son partenaire tombé dans le trou noir. Or, d'après un principe nommé monogamie de l'intrication, une particule ne peut être simultanément intriquée avec deux systèmes différents (ici, le partenaire tombé dans le trou noir et l'ensemble du rayonnement de Hawking émis par le trou noir).

Pour résoudre cette difficulté, Joe Polchinski et ses collègues ont alors supposé que les intrications des paires étaient rompues au niveau de l'horizon des événements du trou noir. Mais ce phénomène devrait s'accompagner d'une libération d'énergie qui, à l'échelle de l'astre, devient importante au voisinage de l'horizon, ce que les physiciens ont nommé le *firewall* (« mur de feu »). Cette solution a un inconvénient majeur : l'horizon ne serait plus, comme en relativité générale, une frontière virtuelle

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



© Université de Delft

où rien de particulier ne se passe. Mais l'idée ER = EPR, qui stipule que l'intérieur du trou noir fait partie d'un trou de ver reliant l'astre à un autre système, atténue certains aspects de ce paradoxe.

Bien que nous ayons identifié une connexion entre les trous de ver et les états intriqués en considérant des trous noirs, il est tentant de spéculer que le lien est plus général : qu'à chaque fois que nous avons une intrication, nous avons une sorte de connexion géométrique. Il en serait ainsi même dans le cas le plus simple, quand nous n'avons que deux particules intriquées.

Un principe universel ?

Pour en revenir au paradoxe du *firewall*, du fait de l'intrication des paires de particules, l'une s'échappant et l'autre tombant dans le trou noir, un trou de ver devrait les relier et, de fait, les espaces à l'intérieur et à l'extérieur seraient connectés. Pour se faire une image de la situation, le trou noir ressemblerait à une pieuvre géante dont les tentacules (les trous de ver) seraient reliés aux particules du rayonnement de Hawking.

Si l'équivalence entre les trous de ver et l'intrication quantique se généralise, la connexion spatiale pourrait impliquer de minuscules structures quantiques qui ne suivraient pas notre vision habituelle de la géométrie. Nous ne savons toujours pas décrire ces géométries microscopiques, mais l'intrication de ces structures pourrait, d'une manière ou d'une autre, donner naissance à l'espace-temps lui-même. C'est comme si l'intrication pouvait être considérée comme un fil reliant deux systèmes. Quand la quantité d'intrication augmente, nous avons beaucoup de fils, et ensemble ces fils pourraient tisser la trame de l'espace-temps. Dans cette représentation, les équations de la relativité d'Einstein régissent les connexions et les reconnexions de ces fils, tandis que la physique quantique serait l'essence de la construction de l'espace-temps.

Pour le moment, ce tableau relève encore d'une spéculation débridée, mais plusieurs indices pointent vers lui, et de nombreux physiciens se penchent sur ses implications. L'hypothèse de l'équivalence entre intrication et trous de ver fournit une piste pour développer une description quantique de l'espace-temps – ainsi qu'une unification très attendue, et jusqu'à présent insaisissable, de la relativité générale et de la physique quantique. ■

L'INTRICATION QUANTIQUE et sa nature non locale sont testées avec des dispositifs de plus en plus complexes afin d'éliminer toute faille possible dans l'interprétation. En 2015, l'équipe de Ronald Hanson de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a réalisé l'une des expériences les plus abouties, à l'aide de deux dispositifs distants de 1,3 kilomètre.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Susskind, **ER = EPR, GHZ, and the consistency of quantum measurements**, *Forschritte der Physik*, vol. 64(1), pp. 72-83, 2016.

J. Polchinski, **L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?**, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

R. Cowen, **The quantum source of space-time**, *Nature*, vol. 527, pp. 290-293, 2015.

J. Maldacena et L. Susskind, **Cool horizons for entangled black holes**, *Fortschritte der Physik*, vol. 61(9), pp. 781-811, 2013.

Au-delà de la grammaire universelle

Paul Ibbotson et Michael Tomasello

L'enfant est-il muni de règles de grammaire innées qui lui permettent d'apprendre n'importe quelle langue ? Cette théorie de Noam Chomsky, longtemps dominante, a du plomb dans l'aile. L'enfant apprendrait plutôt de ce qu'il entend, en exploitant des facultés cognitives générales.

L'idée que notre cerveau comporte un modèle mental permettant d'apprendre la grammaire, théorie mise en avant par Noam Chomsky, professeur émérite au MIT, l'institut de technologie du Massachusetts, a dominé la science linguistique pendant près d'un demi-siècle. Mais des recherches récentes portant sur de nombreuses langues du monde, ainsi que sur la façon dont les jeunes enfants apprennent à comprendre et parler la langue de leur milieu, ont conduit des chercheurs en cognition et en linguistique à abandonner en masse la théorie de la « grammaire universelle » : ces travaux ne permettent pas de soutenir la conception de Noam Chomsky.

Les travaux de recherche suggèrent une vision radicalement différente, selon laquelle l'apprentissage de la langue maternelle par l'enfant ne repose pas sur un module grammatical inné. Ils montrent plutôt que les jeunes enfants utilisent divers types de capacités cognitives qui ne seraient pas du tout spécifiques au langage, telle la capacité à classer le monde dans des catégories (personnes ou objets, par exemple) ou la capacité à comprendre les relations entre les choses. Ces capacités, associées à l'aptitude proprement humaine à saisir ce que les autres cherchent à communiquer, permettent au langage de se développer.

L'ESSENTIEL

- **Les études linguistiques de terrain ont remis en question la théorie de la grammaire universelle, selon laquelle le cerveau comporte un modèle mental spécifique à la grammaire.**
- **Cette théorie de Noam Chomsky a longtemps dominé la linguistique et a été amendée plusieurs fois.**
- **Celle de la « linguistique fondée sur l'usage » postule que pour apprendre à parler, l'enfant mobilise des capacités cognitives générales et le décodage des intentions des personnes autour de lui.**

Chercher dans une autre direction

Les nouvelles découvertes indiquent que si les chercheurs veulent véritablement comprendre comment un enfant, ou un adulte, apprend une langue, ils doivent chercher dans une autre direction que celle de la théorie de Chomsky.

Cette conclusion est importante parce que l'étude du langage joue un rôle central dans divers domaines : poésie, intelligence artificielle, linguistique, etc. De plus, les humains utilisent le langage d'une façon que les animaux ne peuvent pas égaler. Si l'on comprend ce qu'est le langage, on comprendra donc un peu mieux la nature humaine.

La première version de la théorie de Chomsky, proposée au milieu du XXe siècle, faisait écho à deux tendances émergentes

Clydersleeve

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

hello
bye
mommy
dadda
X
Why?
What?
YES
NO
X
Where's the...
Dog
Ball

LES AUTEURS

Paul IBBOTSON est maître de conférences en développement du langage à l'Open University, basée en Angleterre.

Michael TOMASELLO est codirecteur de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, en Allemagne.

dans la vie intellectuelle occidentale. D'une part, Noam Chomsky a postulé que les langues dont on se sert pour communiquer au quotidien fonctionnent comme les langages d'inspiration mathématique utilisés en informatique, un domaine tout récent à l'époque. Ses recherches visaient à déterminer la structure formelle sous-jacente de la langue et à proposer un ensemble de procédures qui créeraient des phrases « bien formées ».

L'idée était révolutionnaire : un programme de nature informatique pourrait produire des phrases que des personnes réelles considèrent comme grammaticales. Ce programme était aussi censé expliquer comment les gens créent leurs phrases. Cette façon d'envisager le langage a séduit de nombreux chercheurs prompts à adopter une approche formelle concernant… eh bien en fait… tout.

Noam Chomsky avançait par ailleurs que les théories qu'il développait étaient ancrées dans la biologie humaine. Dans la seconde moitié du XXe siècle, il devenait de plus en plus évident que l'histoire de l'évolution de notre espèce était à l'origine de nombreux aspects de la psychologie humaine. Sa théorie a par conséquent fait également écho sur ce plan. La grammaire universelle a été présentée comme une composante innée de l'esprit humain, et elle promettait de révéler les profonds soubassements biologiques des plus de 6 000 langues existantes. Les plus puissantes théories, voire les plus belles, révèlent une unité cachée sous une diversité superficielle ; c'est pourquoi l'idée de Chomsky a immédiatement séduit.

Cependant, cette théorie a été mise à mal et s'éteint lentement depuis des années. Si elle s'éteint si lentement, c'est parce que, comme l'a un jour remarqué le physicien allemand Max Planck, les chercheurs plus âgés ont tendance à s'accrocher à leurs vieilles antiennes : « La science progresse enterrement après enterrement. »

Des langues européennes comme modèles

Les premières incarnations de la grammaire universelle, dans les années 1960, prenaient comme point de départ la structure sous-jacente des langues « européennes moyennes standard », c'est-à-dire celles parlées par la plupart des linguistes qui les étudiaient. Ainsi, le programme de la grammaire universelle opérait sur des segments de langue, tels que les groupes nominaux (par exemple : « Les gentils chiens ») et les groupes verbaux (par exemple : « aiment les chats »).

Cependant, assez rapidement, des comparaisons entre de nombreuses langues ont montré que cet élégant schéma n'était pas toujours valide. Certaines langues aborigènes d'Australie, telles que le warlpiri, présentaient des éléments grammaticaux dispersés dans toute la phrase – les groupes nominaux et verbaux n'étaient pas agencés comme il le faudrait pour être en accord avec la grammaire universelle de Chomsky – et certaines phrases n'avaient pas de groupe verbal du tout.

Il était difficile de concilier ces prétendues exceptions avec la grammaire universelle, construite à partir d'exemples tirés des langues européennes. D'autres exceptions à la théorie de Chomsky sont également apparues avec l'étude des langues « ergatives », telles que le basque ou l'urdu, où l'emploi du sujet de la phrase est très différent de celui de nombreuses langues européennes, ce qui à nouveau contredisait l'idée d'une grammaire universelle.

Ces découvertes, ainsi que d'autres travaux en linguistique théorique, ont conduit Noam Chomsky et ses disciples à réviser drastiquement la notion de grammaire universelle dans les années 1980. La nouvelle version de sa théorie, le modèle dit des principes et des paramètres, a remplacé l'idée d'une grammaire unique pour toutes les langues du monde par un ensemble de principes « universels » qui régissent la structure du langage, ces principes étant censés se manifester différemment dans chaque langue.

On pourrait faire une analogie avec le fait que nous sommes tous nés avec un ensemble de saveurs fondamentales (le sucré, le salé, l'amer, l'acide et l'umami) qui interagissent avec la culture, l'histoire et la géographie, ce qui a conduit aux diverses cuisines du monde. Les « principes et paramètres » étaient une analogie linguistique des saveurs. Ils interagissaient avec la culture (qu'un enfant apprenne le japonais ou l'anglais) – les variations actuelles dans les langues en sont le résultat – et définissaient l'ensemble des langues humaines susceptibles d'exister.

Par exemple, des langues telles que l'espagnol forment des phrases tout à fait grammaticales sans qu'il soit nécessaire d'avoir un sujet séparé. Il en est ainsi de *Tengo zapatos* (« J'ai des chaussures »), phrase où la personne qui a les chaussures, « Je »,

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

n'est pas indiquée par un mot séparé, mais par le *o* à la fin du verbe. Noam Chomsky soutenait qu'aussitôt que les enfants avaient rencontré quelques phrases de ce type, leur cerveau réglait leur interrupteur sur « marche », indiquant par là que le sujet de la phrase devait être omis : ils savaient désormais qu'ils pouvaient omettre le sujet dans leurs phrases.

Le paramètre « sujet omis » était aussi censé déterminer d'autres caractéristiques structurelles de la langue. Cette notion de principes universels s'accorde assez bien à de nombreuses langues européennes. Mais il s'est révélé que les données provenant de langues non européennes ne correspondaient pas à la version révisée de la théorie de Chomsky. Les recherches visant à identifier les paramètres, tel celui de l'omission du sujet, ont finalement conduit à l'abandon de la deuxième incarnation de la grammaire universelle.

Plus récemment, en 2002, Noam Chomsky et ses collègues ont décrit, dans un article célèbre publié dans *Science*, une grammaire universelle qui ne comportait qu'un trait, nommé récursivité (bien que de nombreux partisans de la grammaire universelle préfèrent toujours considérer qu'il existe de nombreux principes et paramètres universels). C'est une propriété qui permet de former un nombre illimité de phrases par emboîtements successifs.

Un seul trait universel, la récursivité ?

Par exemple, en français, on peut emboîter des propositions à droite (« Jean espère que Marie sait que Pierre ment »), ou au centre (« le chat, que le chien, que l'enfant a vu, a chassé miaule »). En théorie, il est possible de continuer à emboîter des propositions indéfiniment.

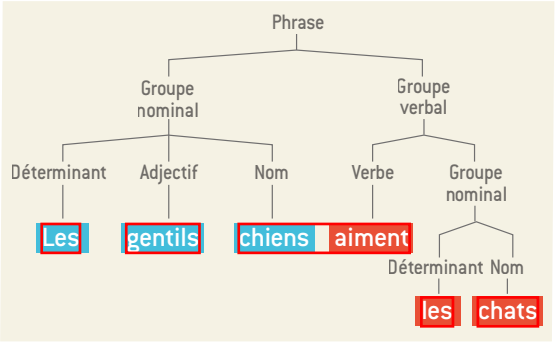
En pratique, cependant, on cesse vite de comprendre, comme c'est le cas dans l'exemple qu'on vient de voir. Noam Chomsky pensait que cela n'est pas directement lié au langage en soi, mais le résultat d'une limitation de la mémoire humaine. Surtout, il a supposé que cette récursivité est ce qui sépare le langage d'autres types de capacités cognitives telles que la catégorisation et la perception des relations entre les choses. Il a aussi récemment émis l'hypothèse que cette capacité serait apparue à la suite d'une mutation génétique unique survenue il y a entre 100 000 et 50 000 ans.

THÉORIES DU LANGAGE

Noam Chomsky a fait sensation au sein de la communauté des linguistes il y a plus de cinquante ans. Son idée était simple : il existe un ensemble de règles sous-jacentes à la langue et innées chez tous les enfants, qui génère des phrases grammaticales depuis la naissance. Noam Chomsky a entrepris de définir ces règles et leur fonctionnement. Sans cette grammaire universelle, pensait-il, il serait impossible qu'un enfant apprenne une langue, quelle qu'elle soit. Mais la théorie chomskyenne a été peu à peu défiée par de nouvelles théories affirmant que la langue est acquise au fur et à mesure que les enfants détectent des patrons dans le langage qu'ils entendent autour d'eux.

LA GRAMMAIRE UNIVERSELLE DE CHOMSKY

L'idée de la grammaire universelle de Chomsky est que l'enfant est équipé de façon innée de règles pour former des propositions (« Les gentils chiens aiment les chats ») et pour les transformer (« Les chats sont aimés des gentils chiens »). La théorie a évolué ces dernières années, mais elle conserve son idée centrale selon laquelle les enfants sont nés avec la capacité à faire concorder les mots avec un modèle syntaxique.



L'APPRENTISSAGE FONDÉ SUR L'USAGE

De nouvelles approches en linguistique et en psychologie suggèrent que la capacité naturelle des enfants à comprendre intuitivement ce que les autres pensent, combinée à des mécanismes puissants d'apprentissage dans le cerveau en développement, diminue la nécessité d'une grammaire universelle. À travers l'écoute, l'enfant apprend des patrons d'usage qui peuvent être appliqués à différentes phrases. Le groupe nominal « ses croquettes » peut remplacer le groupe nominal « sa balle » après la proposition « le chien veut ». Des études montrent que cette théorie de la construction de la connaissance du sens des mots et de la grammaire décrit approximativement la façon dont les jeunes enfants apprennent réellement la langue.

© Lucy Reading-Ikkanda

Comme pour les versions précédentes, quand des linguistes sont allés examiner les variations dans les langues du monde, ils ont trouvé des contre-exemples à l'affirmation selon laquelle ce type de récursivité est une propriété essentielle du langage. Certaines langues – par exemple le pirahã, parlé en Amazonie – semblent se passer de la récursivité chomskyenne.

Une théorie doit être prédictive

Comme toute théorie linguistique, la grammaire universelle de Chomsky essaie de trouver un juste équilibre. La théorie doit être suffisamment simple pour présenter de l'intérêt. Autrement dit, elle doit prédire des phénomènes qui ne sont pas contenus dans la théorie elle-même (sinon, c'est juste une liste de faits). Et elle ne doit pas être simple au point de ne pas pouvoir expliquer des phénomènes qui devraient l'être.

Prenons par exemple l'idée de Noam Chomsky que, dans toutes les langues du monde, les phrases ont un « sujet ». Le problème est que le concept de sujet se définit davantage en termes de « ressemblance familiale » de traits que comme une catégorie bien délimitée. Une trentaine de traits grammaticaux différents définissent les caractéristiques d'un sujet. Une langue donnée ne présentera qu'un sous-ensemble de ces traits, et souvent les sous-ensembles ne se recoupent pas d'une langue à l'autre.

Noam Chomsky a essayé de définir les composantes de la boîte à outils indispensable au langage – les types de machineries mentales qui permettent au langage humain d'exister. Quand des contre-exemples ont été trouvés, certains défenseurs de Noam Chomsky ont répondu que le fait qu'une langue ne soit pas équipée d'un certain outil – la récursivité, par exemple – ne signifie pas que ce dernier ne fait pas partie de la boîte à outils. De la même façon, ce n'est pas parce qu'une culture n'a pas de sel pour assaisonner ses aliments que le salé n'appartient pas au répertoire de base des saveurs. Malheureusement, ce type de raisonnement rend les propositions de Noam Chomsky difficiles à tester en pratique, et parfois elles frisent la non-réfutabilité.

L'un des problèmes majeurs des théories chomskyennes est que lorsqu'elles sont appliquées à l'acquisition du langage, elles stipulent que les jeunes enfants ont, dès la naissance, la capacité à former des phrases à l'aide de règles grammaticales abstraites (leur nature précise dépend de la version de la théorie qui est adoptée). Or de nombreuses recherches montrent maintenant que l'acquisition du langage ne se passe pas ainsi. Les enfants commencent plutôt par apprendre des patrons grammaticaux simples ; puis ils dégagent progressivement et de façon intuitive les règles qui leur sont sous-jacentes, morceau par morceau.

Ainsi, les jeunes enfants parlent au début uniquement à l'aide de constructions grammaticales simples et concrètes fondées sur des patrons de mots spécifiques : « Où il est le X ? » ; « Veux X » ; « Encore X » ; « C'est un X » ; « C'est X qui » ; « Mets X là » ; « Donne X » ; « Lance X » ; « X parti » ; « Maman a X-é » ; « M'assois sur X », « Ouvre X » ; « X ici » ; « Il y a X » ; « Cassé X ». Plus tard, les enfants combinent ces premiers patrons pour en faire de plus complexes, comme dans : « Où il est le X que Maman a X-é ? » De nombreux défenseurs de la grammaire universelle acceptent cette description du premier développement de la grammaire chez les enfants. Mais ils considèrent ensuite que lorsque des constructions plus complexes émergent, ce nouveau stade reflète la maturation d'une capacité cognitive qui s'appuie sur la grammaire universelle ainsi que sur ses catégories et principes grammaticaux abstraits.

Par exemple, la plupart des approches de la grammaire universelle postulent qu'un enfant forme une proposition interrogative indirecte en suivant un ensemble de règles fondées sur des catégories grammaticales telles que « Nino [sujet] demande [verbe] qui [objet] tu [sujet] as [auxiliaire] vu [verbe]. » Réponse : « J' [sujet] ai [auxiliaire] vu [verbe] l'ours [objet] ». Si ce postulat était correct, alors, à un moment de leur développement, les enfants devraient faire les mêmes erreurs dans toutes les interrogatives indirectes du même type.

Les erreurs que font les enfants ne correspondent pas aux prédictions chomskyennes

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

NOAM CHOMSKY, en 2010. Ce linguiste américain né en 1929 a exercé une forte influence sur sa discipline depuis la fin des années 1950, avec notamment sa théorie de la grammaire universelle. C'est aussi un célèbre intellectuel engagé, de tendance anarchiste, qui a exprimé des positions très critiques notamment sur la politique étrangère des États-Unis, sur celle d'Israël vis-à-vis des Palestiniens et sur de nombreuses questions sociétales ou politiques.

© Shutterstock.com/deepspace

Mais les erreurs des enfants ne correspondent pas à cette prédiction. Nombre d'entre eux font des erreurs telles que « Nino demande tu pars quand ? », mais, en même temps qu'ils font cette erreur – mettre le pronom interrogatif « quand » à la fin de la phrase plutôt que derrière le premier verbe – ils forment correctement d'autres phrases interrogatives indirectes, comme « Nino demande où il est. »

Des études expérimentales confirment pour des phénomènes similaires en anglais que les enfants produisent des phrases correctes avec des pronoms interrogatifs spécifiques (souvent ceux qu'ils ont le plus rencontrés dans ce contexte), tout en continuant à faire des erreurs avec d'autres (souvent moins fréquents).

La principale réponse des partisans de la grammaire universelle à de tels résultats est que les enfants en ont la compétence en termes de grammaire, mais que d'autres facteurs peuvent entraver leur performance, c'est-à-dire leur réalisation effective, et donc cacher la nature véritable de leur grammaire ainsi que faire obstacle à l'étude de la grammaire « pure » postulée par la linguistique de Chomsky. Les facteurs qui masquent la grammaire sous-jacente, disent-ils, incluent des capacités mémorielles, attentionnelles et sociales immatures.

Pourtant, l'interprétation chomskyenne du comportement des enfants n'est pas la seule possible. Les capacités mentionnées ne masquent peut-être pas le statut réel de la grammaire ; elles pourraient bien plutôt jouer un rôle premier dans la construction d'une langue.

Par exemple, une étude récente à laquelle a participé l'un de nous (Paul Ibbotson) a montré que la capacité des enfants à produire des éléments tels qu'un participe passé irrégulier – comme dans « Tous les jours je prends un goûter, hier j'ai pris un goûter » (et pas « prendu ») – était associée à leur capacité à inhiber, dans un contexte sans lien avec la grammaire, une réponse tentante mais incorrecte (par exemple, dire le mot « Lune » en voyant un dessin censé représenter le Soleil).

Plutôt que d'empêcher les enfants d'exprimer la grammaire à l'état brut de la linguistique chomskyenne, la mémoire, les analogies mentales, l'attention et le raisonnement portant sur des situations sociales sont des facultés mentales qui peuvent expliquer pourquoi le langage se développe comme il le fait.

Tout comme avec le repli par rapport aux données relatives aux multiples langues et l'argument de la boîte à outils, l'idée d'une performance qui masque la compétence est relativement non réfutable. Recourir à ce type d'affirmations est courant dans les paradigmes scientifiques en déclin qui ne disposent pas d'une base empirique solide – on peut notamment penser à la psychologie freudienne et aux interprétations marxistes de l'histoire.

Même si l'on met de côté les problèmes empiriques auxquels la grammaire universelle est confrontée, les psycholinguistes qui travaillent avec des enfants ont des difficultés à concevoir théoriquement un processus au cours duquel les enfants commencent avec les mêmes règles grammaticales algébriques pour toutes les langues puis se mettent à déterminer comment une langue particulière – que ce soit l'anglais ou le swahili – est connectée à ce schéma de règles. Les linguistes appellent cela l'énigme de la question du lien.

Le psycholinguiste Steven Pinker, de l'université Harvard, a fait l'une des rares tentatives pour la résoudre, dans le contexte de la grammaire universelle avec les sujets de phrase. Son traitement s'est néanmoins révélé en désaccord avec des données issues d'études sur le développement des enfants. Il n'était pas non plus applicable à d'autres catégories grammaticales que le sujet. Ainsi, la question du lien – qui devrait être centrale dans l'application de la grammaire universelle à l'apprentissage du langage – n'a jamais été résolue ou même sérieusement abordée.

Une vision alternative

Tout cela conduit inéluctablement à considérer que la notion de grammaire universelle est tout simplement fausse. Bien sûr, les scientifiques n'abandonnent jamais leur théorie préférée, même face à des preuves qui la contredisent, avant qu'une alternative raisonnable apparaisse. Or il existe à présent une telle alternative, nommée linguistique fondée sur l'usage.

Cette théorie, qui prend plusieurs formes, considère que la structure

grammaticale n'est pas innée. La grammaire est plutôt le produit de l'histoire (les processus qui façonnent la manière dont les langues sont transmises d'une génération à l'autre) et de la psychologie humaine (l'ensemble des capacités sociales et cognitives qui permettent aux générations d'apprendre une langue en premier lieu). Mais surtout, cette théorie considère que le langage engage des systèmes cérébraux qui ne sont pas apparus dans cet objectif spécifique. L'idée est donc bien différente de celle, chomskyenne, de la mutation d'un gène unique ayant conduit à la récursivité.

Un équivalent mental du couteau suisse

Dans la nouvelle approche fondée sur l'usage (qui inclut des idées venant de la linguistique fonctionnelle, la linguistique cognitive et les « grammaires de construction »), les enfants ne naissent pas avec un outil universel dédié à l'apprentissage de la grammaire. Au lieu de cela, ils héritent d'un équivalent mental du couteau suisse : un ensemble d'outils d'usage général tels que la catégorisation, le déchiffrage des intentions communicatives et la faculté de faire des analogies, outils avec lesquels les enfants construisent des catégories et règles grammaticales à partir de la langue qu'ils entendent autour d'eux.

Par exemple, les enfants francophones comprennent « Le chat a mangé le lapin », et, par analogie, ils comprennent également « La chèvre a chatouillé la fée ». Ils généralisent au fur et à mesure des exemples qu'ils entendent. Après avoir rencontré suffisamment d'exemples de ce type, ils sont même peut-être capables de deviner qui a fait quoi à qui dans la phrase « Le dazeur a mibé le toma », même si plusieurs mots sont dépourvus de sens. La grammaire doit être quelque chose qu'ils discernent au-delà des mots mêmes, puisque les phrases n'ont que peu d'éléments communs au niveau des mots.

Le sens dans la langue émerge à travers une interaction du sens potentiel des mots mêmes (par exemple ce que le mot « mangé » peut signifier) avec le sens de la construction grammaticale dans laquelle ils sont insérés. Par exemple, même si « glisser » dans son sens premier est un verbe intransitif qui ne se combine qu'avec un seul actant (celui qui glisse), si on le place dans une construction ditransitive, c'est-à-dire une construction qui peut prendre à la fois un complément d'objet direct et un complément d'objet indirect, le résultat pourrait être « Elle lui a glissé une serviette », phrase où « glisser » est interprété comme une action de transfert. Cet exemple montre que la structure grammaticale peut contribuer de façon importante au sens de l'énoncé, au même titre que les mots. On peut remarquer le contraste entre cette idée et celle de Noam Chomsky, qui affirmait que certains niveaux de la grammaire sont entièrement vides de sens.

Le concept du couteau suisse explique aussi l'apprentissage du langage sans avoir à invoquer deux phénomènes requis par la grammaire universelle. Le premier est une série de règles algébriques pour combiner les symboles – ou grammaire noyau – qui est programmée dans le cerveau. Le second est un lexique – une liste d'exceptions – qui couvre toutes les autres expressions idiomatiques et les idiosyncrasies des langues naturelles, qui doivent être apprises.

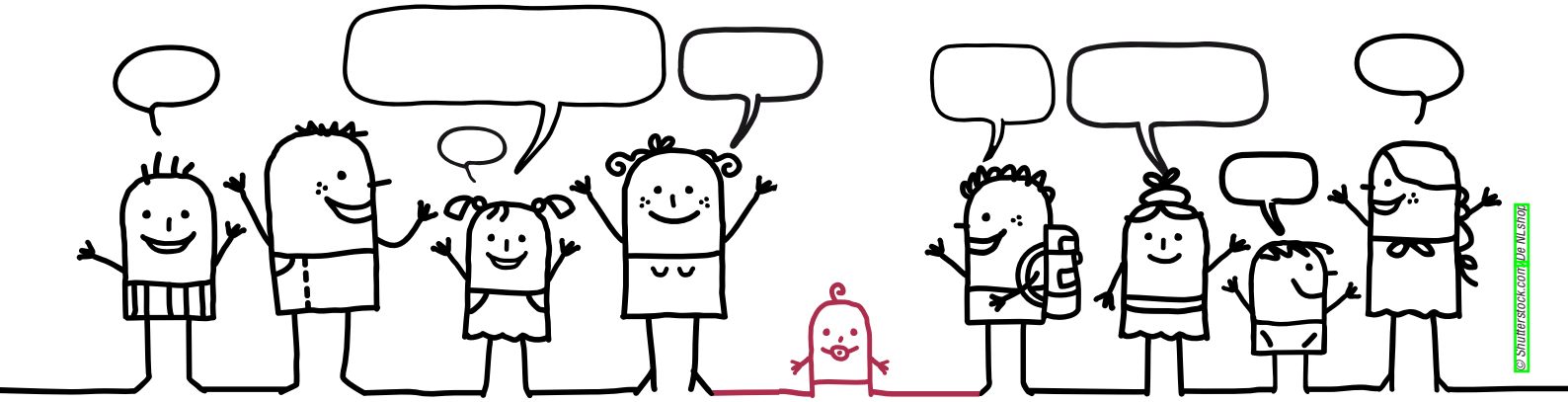
Le problème avec cette approche à deux voies est que certaines constructions grammaticales sont à la fois partiellement fondées sur des règles et partiellement pas. Il en est ainsi dans « Lui, un candidat présidentiel ?! », où le sujet « lui » conserve la forme d'un complément d'objet direct, mais dans une phrase où les éléments ne sont pas dans le bon ordre. Un locuteur natif du français peut générer une variété infinie de phrases en utilisant le même procédé : « Elle, aller au ballet ?! », « Ce gars, un médecin ?! », etc.

La question se pose donc : ces énoncés font-ils partie de la grammaire noyau ou de la liste d'exceptions ? S'ils ne font pas partie d'une grammaire noyau, alors ils doivent être appris individuellement comme des objets distincts. Mais si les enfants peuvent apprendre ces énoncés partiellement réguliers et partiellement exceptionnels, pourquoi alors ne peuvent-ils pas apprendre le reste de la langue de la même façon ? Autrement dit, pourquoi ont-ils finalement besoin de la grammaire universelle ?

En réalité, l'idée d'une grammaire universelle est en contradiction avec des résultats montrant que les enfants apprennent la langue à travers les interactions sociales, et qu'ils acquièrent de l'expérience en utilisant des constructions de phrases créées par les communautés linguistiques au fil du temps. Dans certains cas, nous avons des données qui montrent très bien comment de tels apprentissages ont lieu.

Par exemple, les propositions relatives sont plutôt courantes dans les langues du monde, et elles sont souvent dérivées de la combinaison de phrases séparées. Ainsi, on peut dire : « Mon frère… Il vit en Arkansas… Il aime jouer du piano. » En raison de divers mécanismes de traitement cognitif (schématisation, habituation, décontextualisation, automatisation...), ces

SELON L'APPROCHE de la « linguistique fondée sur l'usage », l'enfant apprend sa langue à partir de ce qu'il entend dans son entourage, et ce grâce à des outils cognitifs généraux, non spécifiques au langage.



© Shutterstock.com/De NLshop

propositions évoluent pour former, au bout d'une longue période, une construction plus complexe : « Mon frère, qui vit en Arkansas, aime jouer du piano. » Ou ces mécanismes peuvent faire évoluer progressivement une phrase comme « J'ai poussé Marie, et elle est tombée par terre » vers « J'ai poussé Marie par terre ».

De plus, il semblerait que notre espèce ait une capacité spécifique à décoder les intentions communicatives des autres – ce qu'un locuteur a l'intention de dire. Par exemple, on dit : « Je me rappelle/remémore mon premier chat », et non : « Je me souviens mon premier chat. » Des recherches récentes ont montré que plusieurs mécanismes empêchent les enfants de faire des analogies inappropriées. Par exemple, les enfants ne font pas d'analogies dépourvues de sens. Ils ne seraient donc jamais tentés de dire : « Je me réveille mon premier chat. » De plus, si les enfants entendent relativement souvent : « Je me souviens de mon premier chat », alors cet usage évite qu'ils soient tentés de dire : « Je me souviens mon premier chat. »

Des mécanismes si contraignants réduisent considérablement les analogies qu'un enfant pourrait faire, ne laissant que celles compatibles avec les intentions communicatives de la personne qu'il est en train d'essayer de comprendre. Nous utilisons tous ce type de décodage d'intention quand nous comprenons : « Pouvez-vous ouvrir la porte ? » comme une demande d'aide, et non comme une question concernant notre aptitude à ouvrir une porte.

Noam Chomsky avait prévu une place pour ce type de « pragmatique » – comment nous utilisons la langue en contexte – dans sa théorie sur le fonctionnement du langage. La langue est tellement ambiguë qu'il était contraint de le faire. Mais il semble qu'il ait considéré que le rôle de la pragmatique est périphérique par rapport à celui de la grammaire, qui, elle, joue un rôle central. D'une certaine façon, les contributions des approches fondées sur l'usage ont déplacé le débat dans la direction opposée en se demandant ce que la pragmatique peut apporter à la langue avant que les locuteurs aient besoin de faire appel aux règles de la syntaxe.

Les théories fondées sur l'usage sont loin d'offrir une explication complète sur le fonctionnement du langage. Les généralisations signifiantes que les enfants font à partir de phrases et de propositions qu'ils ont entendu prononcer n'expliquent pas entièrement non plus comment ils construisent des phrases – il y a des généralisations qui ont du sens, mais qui ne sont pas grammaticales (par exemple : « Elle a disparu l'oiseau »). Bien que les possibilités soient nombreuses, les enfants semblent néanmoins faire très peu de généralisations de ce type – apparemment parce qu'ils sont sensibles au fait que la communauté linguistique à laquelle ils appartiennent se conforme à une norme et communique une idée seulement « de cette façon ».

L'équilibre est cependant délicat chez les enfants, puisque leur langage est à la fois créatif (« J'ai prendu un crayon ») et conforme aux normes grammaticales (« J'ai pris un crayon »). Les partisans des théories fondées sur l'usage ont encore beaucoup de chemin à faire pour expliquer comment ces forces interagissent pendant l'enfance d'une façon qui rende compte exactement de la trajectoire du développement du langage.

Quelles perspectives ?

À l'époque où le paradigme chomskyen a été proposé, il était en rupture totale avec les approches plus informelles qui prévalaient à l'époque, et il a attiré l'attention sur toutes les complexités cognitives mises en œuvre pour devenir un locuteur compétent dans la production et la compréhension de la langue. Mais alors que des théories comme celle de Chomsky nous ont permis de voir de nouvelles choses, elles nous ont aussi aveuglés sur d'autres aspects. En linguistique et dans les domaines qui lui sont reliés, de nombreux chercheurs sont de plus en plus insatisfaits par une approche totalement formelle du langage comme la grammaire universelle – sans parler des inadéquations empiriques de la théorie. Par ailleurs, aujourd'hui, les analyses purement théoriques trouvent de moins en moins de partisans : on dispose aujourd'hui de corpus volumineux de données linguistiques permettant de tester une théorie, et beaucoup d'entre eux sont en ligne.

On peut ainsi faire de nouvelles découvertes passionnantes en examinant en détail les différentes langues du monde, en quoi elles sont semblables ou différentes les unes des autres, comment elles changent dans le temps, et comment les jeunes enfants acquièrent une ou plusieurs d'entre elles, sans s'enfermer dans des paradigmes qui semblent dépassés. ■

BIBLIOGRAPHIE

Collectif, **La linguistique fondée sur l'usage : approches théoriques et analyses,** *Travaux de Linguistique*, n° 62, 2011.

J. Bybee, **Language, Usage and Cognition,** Cambridge University Press, 2010.

A. Goldberg, **Constructions at Work : The Nature of Generalization in Language,** Oxford University Press, 2006.

M. Tomasello, **Constructing a Language : A Usage-Based Theory of Language Acquisition,** Harvard University Press, 2005.

L'indispensable dialogue

Dale Laird, Paul Lampe et Ross Johnson

La plupart des cellules communiquent avec leurs voisines *via* des myriades de minuscules canaux. Un système de signalisation essentiel tant aux battements cardiaques qu'à la cicatrisation.

© Peter Kraemer

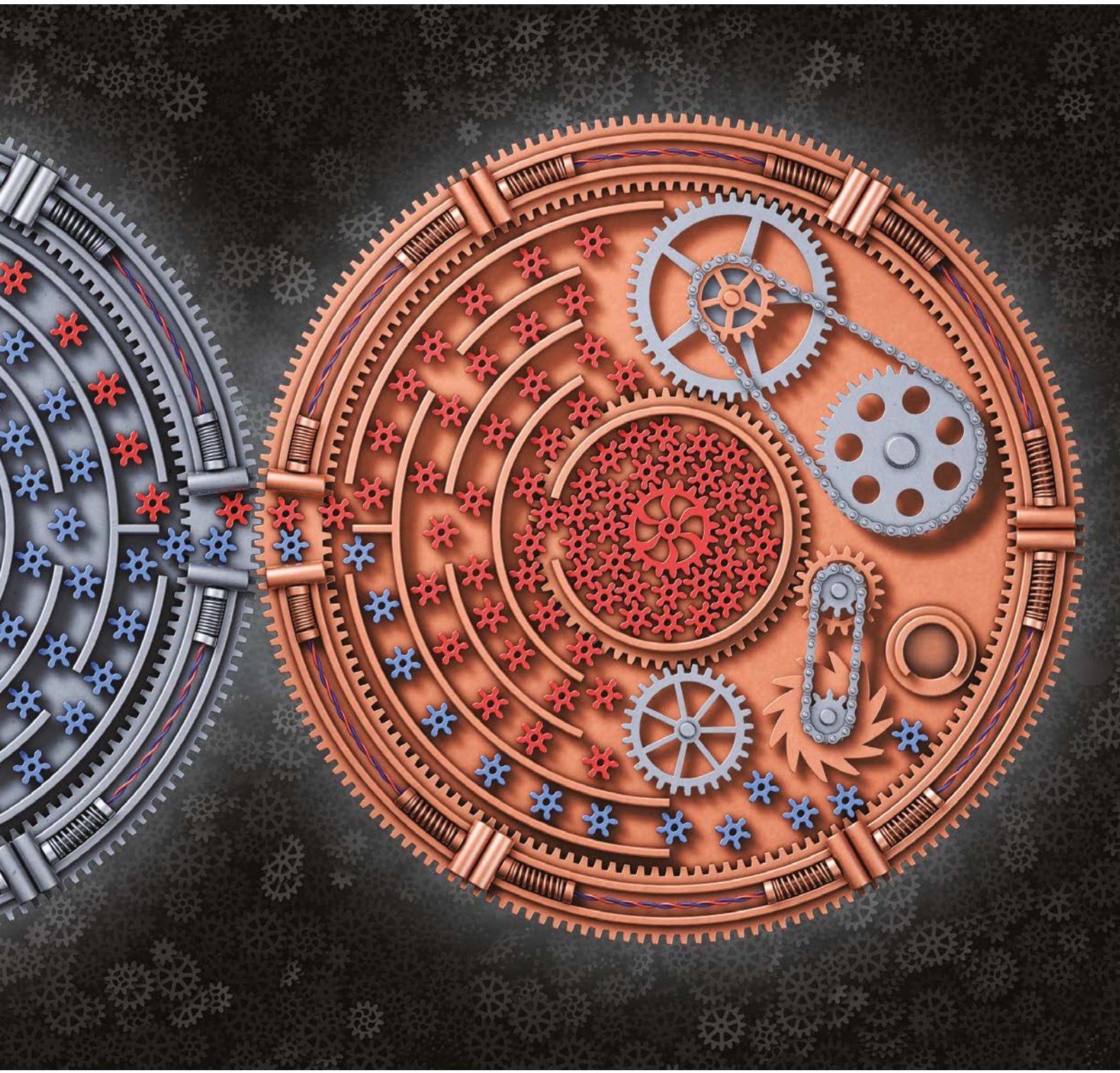
Les cellules de notre corps maîtrisent l'art de la communication. À l'instar des personnes qui partagent des nouvelles *via* Twitter, Facebook ou Linkedin, elles utilisent divers systèmes pour échanger des informations, selon leur fonction. Certaines libèrent des hormones, lesquelles voyagent dans tout l'organisme *via* la circulation sanguine ; d'autres émettent des neurotransmetteurs, molécules qui véhiculent des signaux d'un neurone à un autre. Mais un mode de communication est commun à pratiquement toutes les cellules : deux voisines sont directement connectées grâce à une multitude de canaux nanométriques qui traversent leurs membranes et permettent le passage d'ions et de petites molécules hydrophiles entre leurs milieux intérieurs.

Des fuites fluorescentes

Vers le milieu des années 1960, Werner Loewenstein, de l'université Columbia, à New York, et ses collègues ont observé un effet spectaculaire de cette forme de communication. Ils ont injecté des molécules d'un colorant fluorescent dans une cellule enserrée au milieu d'un tapis de ses congénères. Au microscope, ils ont vu que la fluorescence se propageait

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

des **cellules**



© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

rapidement de la cellule injectée aux cellules environnantes, atteignant parfois des centaines d'entre elles. Des études antérieures avaient suggéré que des ions transmettaient des signaux électriques entre cellules voisines, mais l'observation de la propagation de molécules de colorant, plus grosses que des ions, a confirmé l'existence de canaux que les molécules empruntent abondamment pour circuler d'une cellule à l'autre.

Depuis, les biologistes savent que ces canaux sont partout. On en détecte des regroupements dans les tissus de tous les animaux, y compris l'homme, où ils participent à une variété extraordinaire de fonctions. Ces regroupements, nommés jonctions communicantes ou jonctions gap (de l'anglais *gap junctions*), interviennent dans la synchronisation des battements des cellules musculaires cardiaques comme dans la contraction de l'utérus lors de l'accouchement. Les jonctions communicantes aident l'œil à s'ajuster à différentes intensités de lumière. Elles jouent même un rôle dans la formation des organes au cours du développement embryonnaire.

Au cours des vingt dernières années, des scientifiques ont découvert que des anomalies dans l'assemblage des jonctions communicantes ou dans leur activité contribuent à diverses maladies humaines, notamment la perte d'audition, la cataracte, des maladies de peau, des troubles neurologiques, des maladies cardiaques et même certains cancers. Une unique mutation sur une protéine d'une jonction communicante de l'oreille interne explique la perte d'audition chez 40 % des personnes atteintes de surdité héréditaire. Et le nombre de maladies où l'on découvre un lien avec les jonctions communicantes ne cesse d'augmenter. Plusieurs liens ont encore été mis en évidence ces toutes dernières années, notamment avec un type d'épilepsie infantile.

Du calmar aux mammifères

Aujourd'hui, les études s'intéressent à la structure des jonctions communicantes et commencent à révéler comment la perturbation de l'assemblage d'une jonction communicante et de son activité précipite la maladie. Avec l'espoir de mener à de nouvelles thérapies pour de nombreuses pathologies qui surviennent lorsque les cellules ne peuvent plus communiquer directement de cette façon.

Lorsque les premières expériences avec le colorant fluorescent ont eu lieu, les biologistes ne pensaient pas du tout en termes de portée médicale. Dans les années 1960 et 1970, ils recherchaient des preuves supplémentaires de cette mystérieuse communication entre cellules voisines et voulaient en apprendre davantage sur ses propriétés. Avant même que les jonctions communicantes aient été identifiées et nommées, des physiologistes ont observé que ce partage d'informations moléculaires a lieu dans des organes et organismes variés, allant des embryons du calmar et du poisson électrique à divers types de cellules de mammifères. Et ils ont confirmé que les molécules fluorescentes se déplacent directement d'une cellule à une autre à des endroits où leurs membranes sont en contact étroit.

À la fin des années 1960, l'objectif était de déterminer à quoi les canaux ressemblent et comment ils se forment. Des études microscopiques antérieures avaient révélé de grandes plaques où les membranes de deux cellules voisines sont juxtaposées. À ces endroits, les cellules paraissaient séparées d'un interstice très mince, de seulement quelques nanomètres, qui leur avait valu le nom de *gap junctions* (jonctions à interstice) en anglais. Ce nom leur est resté même après la découverte que cet espace n'est pas vide, mais rempli des parties des canaux qui relient une cellule à une autre.

Des milliers de canaux par jonction

Pour explorer le rôle de ces plaques membranaires dans la « connectivité cellulaire » observée lors des expériences de diffusion de colorant et d'ions chargés, l'un de nous (Ross Johnson) s'est mis à étudier l'assemblage de ces jonctions. Avec ses collègues de l'université du Minnesota, il a délicatement séparé des cellules en culture issues d'une tumeur hépatique, puis les a de nouveau mélangées. En quelques minutes sont apparues des plaques sur les membranes des cellules, mais uniquement aux endroits où un contact s'était établi entre deux cellules. Cette observation confirmait l'idée que l'assemblage d'une jonction communicante est un projet commun de deux cellules adjacentes, nécessitant la collaboration de chacune. Au fur et à mesure que ces

LES AUTEURS

Dale W. LAIRD est professeur de biologie cellulaire et titulaire de la chaire « Jonctions communicantes et maladie » de l'université Western Ontario, au Canada.

Paul D. LAMPE est codirecteur et membre du programme de recherche translationnelle des départements des Sciences de santé publique et de biologie humaine du Centre de recherche sur le cancer Fred Hutchinson, à Seattle aux États-Unis.

Ross G. JOHNSON est professeur émérite de génétique, biologie cellulaire et développement à l'université du Minnesota, aux États-Unis.

L'ESSENTIEL

- Les cellules échangent des signaux avec leurs voisines *via* des jonctions communicantes, des structures qui relient une cellule à une autre.
- Constituées de plus de 100 000 protéines, ces jonctions se renouvellent en permanence.
- Cette restructuration minutieusement contrôlée permet aux cellules de répondre rapidement à une lésion ou au stress.
- Des mutations de gènes codant des protéines des jonctions sont à l'origine de pathologies variées telles que des formes de surdité, d'épilepsie ou de maladie cardiaque.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

plaques s'étendaient et se densifiaient, le courant électrique passant à travers les cellules augmentait également. Ces jonctions semblaient donc faciliter l'échange d'ions.

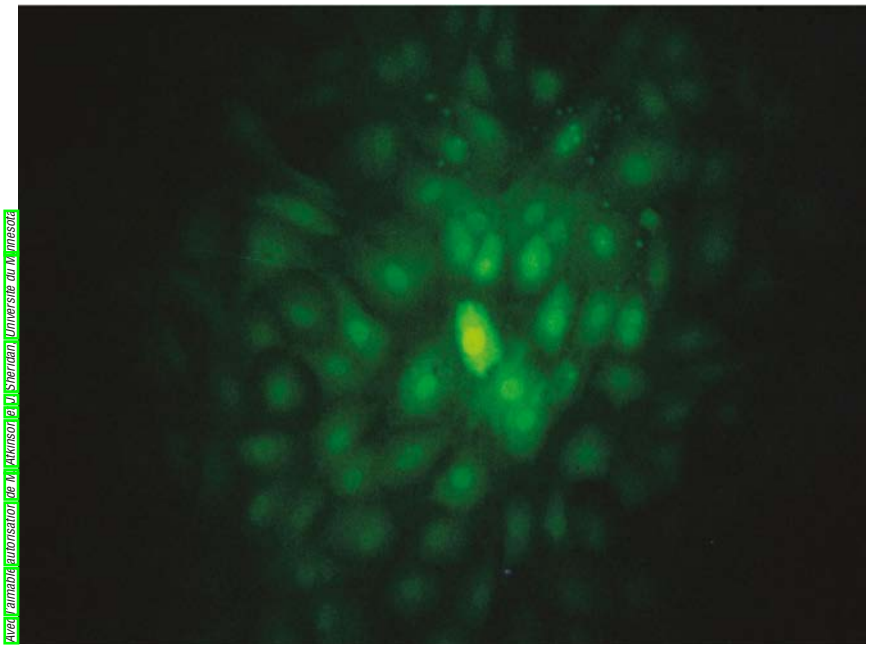
En détachant les membranes des cellules connectées pour les examiner de plus près, Ross Johnson et son équipe ont observé des sortes de grosses particules accumulées dans les plaques. Par la suite, ces particules se sont révélées être les canaux qui, assemblés, constituent les jonctions communicantes *(voir l'encadré pages 48 et 49)*. Chaque canal est formé de protéines d'une même famille – les connexines – identifiée à la fin des années 1980.

Six connexines s'assemblent en un anneau nommé hémicanal. Ce dernier s'insère dans la membrane de la cellule, où il peut alors interagir avec un hémicanal d'une cellule voisine. Lorsque les connexines de ces deux hémicanaux complémentaires interagissent, elles forment un pore continu qui relie les cellules d'une telle façon que les cytoplasmes des deux cellules jointes – c'est-à-dire leurs contenus – communiquent directement. Ce pore est en fait un seul des centaines ou milliers de canaux qui constituent une jonction communicante.

L'édification de ces énormes conglomérats de communication est une entreprise colossale. Une seule jonction peut contenir 10 000 canaux. Chaque canal étant composé de deux hémicanaux, une jonction compte donc environ 120 000 connexines. Or le cœur, par exemple, est constitué à lui seul de milliards de cellules, dont chacune interagit avec plusieurs voisines *via* des jonctions communicantes. Une merveille de l'ingénierie moléculaire !

Plus remarquable encore, ces jonctions communicantes ne sont pas permanentes, ni même de longue durée, mais continuellement démontées et reconstruites. Il a été montré que la moitié des connexines d'une jonction communicante cardiaque sont remplacées toutes les deux heures. En une journée, chaque jonction communicante du cœur humain est très probablement dissociée et remplacée par des canaux nouvellement assemblés.

Au vu de la complexité de ces structures extraordinaires, il semblait vraisemblable que des systèmes de régulation existent, assurant le bon déroulement de leur construction et maintenant ainsi ininterrompues les communications entre cellules. Pour comprendre ces mécanismes



Avec l'aimable autorisation de M. Atkinson et J. Sherman, Université du Minnesota

DU COLORANT FLUORESCENT INJECTÉ dans une cellule en culture *(au centre)* se propage rapidement de proche en proche *via* les canaux des jonctions communicantes qui relient chaque cellule à ses voisines.

de régulation, nous avons décidé – nous étudiions tous trois les jonctions communicantes – de mettre en commun nos compétences ; nous voulions notamment comprendre comment l'assemblage et le démontage de ces jonctions sont contrôlés.

Les connexines, bandes Velcro cellulaires

Nous avons élaboré notre plan d'attaque en 1991, durant la pause-café d'une conférence sur les jonctions communicantes au Centre de conférence d'Asilomar, en Californie. L'un de nous (Paul Lampe) était alors postdoctorant dans le laboratoire de Ross Johnson, à l'université du Minnesota, où l'on s'intéressait désormais à la régulation de l'assemblage des jonctions communicantes. Le dernier membre de notre trio (Dale Laird), postdoctorant dans le laboratoire de Jean-Paul Revel, à l'Institut de technologie de Californie, venait de développer un ensemble d'anticorps se liant spécifiquement aux connexines. Ces anticorps nous permettraient d'interagir avec les connexines et de voir quelles parties de ces molécules sont essentielles pour l'assemblage des jonctions communicantes et leur activité.

Les anticorps de Dale Laird reconnaissaient une connexine particulière nommée Cx43. Le génome humain code 21 connexines, et chaque type cellulaire produit son propre « cocktail » de connexines. Les cellules cutanées, notamment, produisent pas moins de neuf connexines différentes. La protéine Cx43 est le membre le plus répandu de la famille. Elle est présente dans de nombreux organes, notamment la peau, le cœur, le cerveau, les poumons et les os.

Comme toutes les connexines, la protéine Cx43 est constituée de quatre segments transmembranaires qui l'ancrent dans la membrane cellulaire. Sa queue, qui pointe à l'intérieur de la cellule, contient divers éléments qui, nous l'avons montré plus tard, interviennent dans la régulation de son activité et de son assemblage en canaux puis en jonctions. Par ailleurs, en traversant plusieurs fois la membrane cellulaire, la protéine forme deux boucles qui ressortent dans l'espace entre les cellules. Certains anticorps que Dale Laird avait produits visaient ces segments extracellulaires.

Les boucles dépassant de la cellule, elles fonctionnaient peut-être comme des bandes Velcro accrochant les connexines les unes aux autres. Pour tester cette hypothèse, nous avons là encore séparé des cellules en culture, puis nous les avons mélangées à nouveau, mais cette fois en y ajoutant les anticorps de Dale Laird ciblant les boucles. Aucune jonction communicante ne s'est formée : d'aucune cellule testée, le colorant

injecté n'a diffusé vers les cellules voisines, et nous n'avons observé aucune plaque caractéristique du développement de jonctions communicantes. En se fixant sur les boucles, les anticorps avaient empêché les connexines d'une cellule de s'amarrer à celles de ses voisines.

Ces travaux montraient que la liaison des connexines est essentielle pour la construction des jonctions communicantes. Il s'agissait à présent d'observer les connexines en temps réel, au fil de leur activité au sein d'une cellule vivante. Toutefois, nous allions avoir besoin d'une autre technique pour y parvenir.

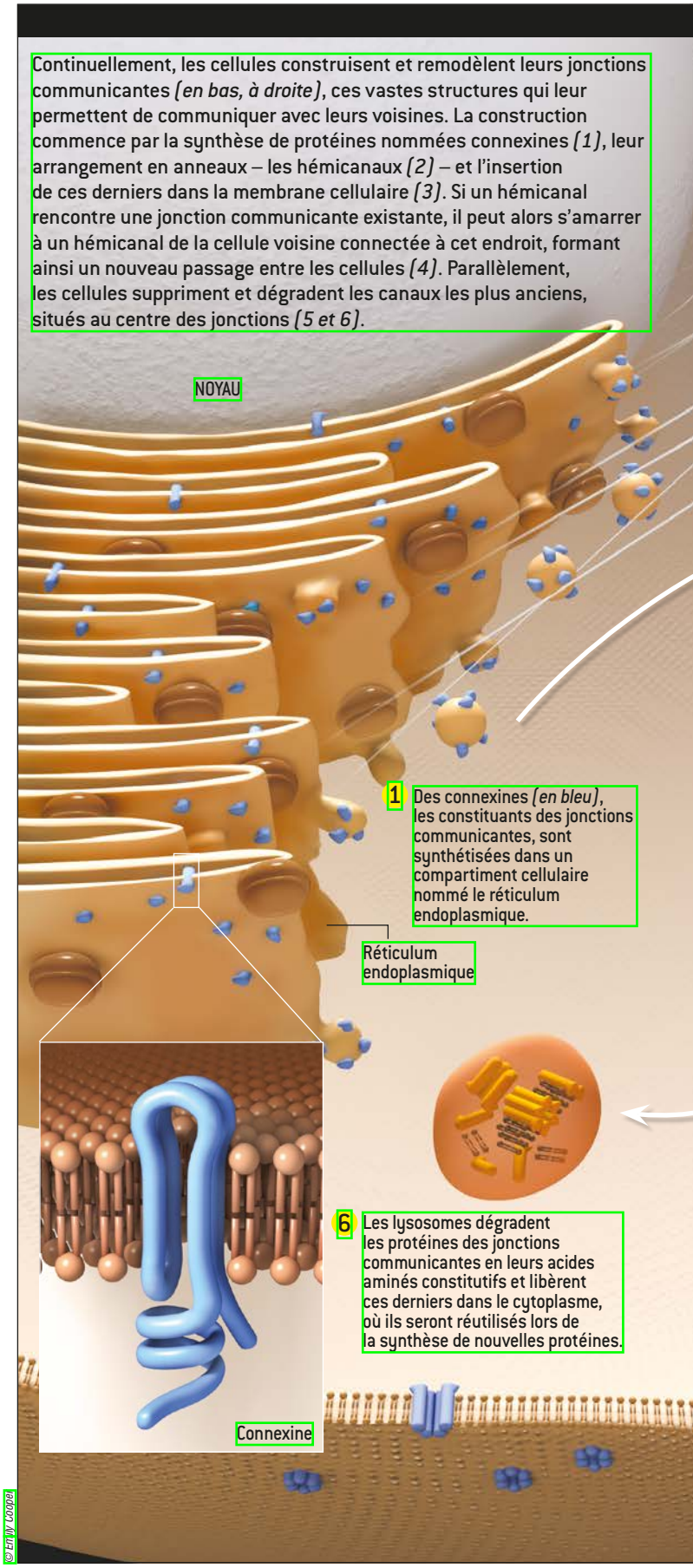
En 1994, nous nous sommes retrouvés tous trois à l'occasion d'une autre conférence – cette fois-ci à San Francisco. Au fil de discussions jusqu'au bout de la nuit sur les présentations auxquelles nous avions assisté, nous nous sommes passionnés pour la protéine fluorescente verte ou GFP (de l'anglais *green fluorescent protein*), un outil moléculaire qui a depuis été récompensé par un prix Nobel, en 2008. Une intervenante avait décrit comment elle avait lié ce marqueur fluorescent à sa protéine d'intérêt pour suivre ses trajets dans des cellules vivantes. Nous nous sommes donc demandé si nous pourrions utiliser la GFP pour suivre les déplacements des connexines.

Nous avons commencé par attacher la GFP à la queue des connexines : nous avons introduit dans des cellules de mammifères un ADN codant la connexine Cx43 associée à la GFP. À notre grand plaisir, cette approche a fonctionné : les connexines ainsi marquées se sont bien intégrées dans la membrane cellulaire, où elles se sont assemblées en jonctions communicantes fonctionnelles qui présentaient pratiquement toutes les propriétés de celles formées à partir de connexines non modifiées. Nous disposions désormais d'un moyen puissant pour observer le comportement de connexines dans les cellules – une tâche que Dale Laird a poursuivie à son nouveau poste à l'université de Western Ontario, au Canada.

Suivez cette connexine !

Nos toutes premières observations furent surprenantes. Nous avons d'abord pris des photos des cellules toutes les dix minutes, pensant que nous pourrions les monter en un film accéléré mettant en évidence le déplacement des connexines fluorescentes. Toutefois, ces dernières se déplaçaient si vite que nous étions incapables de suivre une protéine d'une photo à la suivante. Nous avons réessayé en espaçant les photos de deux minutes, mais c'était toujours insuffisant. Pour suivre nos molécules dans la cellule, nous avons finalement dû prendre des photos séparées de quelques secondes seulement.

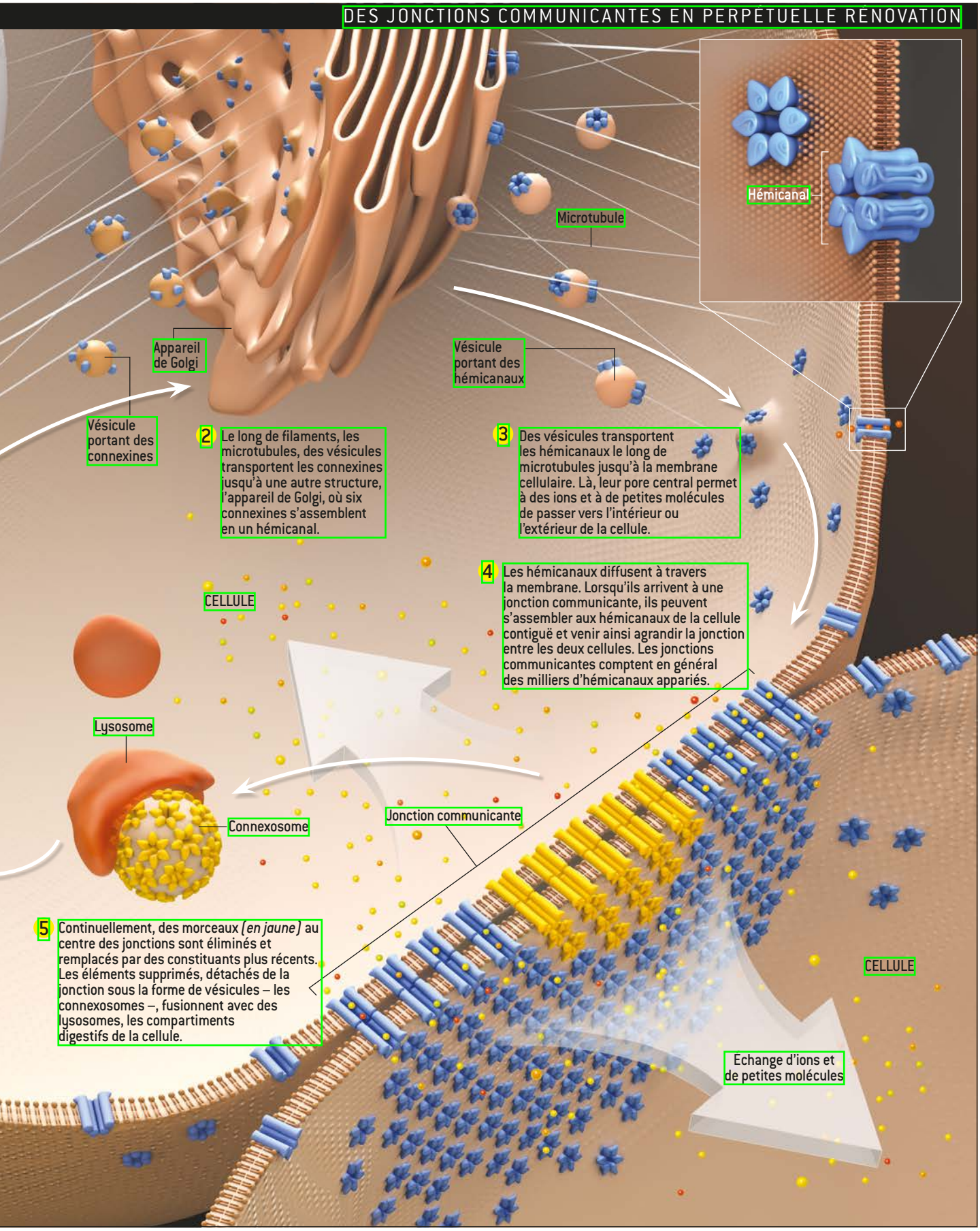
Le film obtenu nous a permis non seulement de suivre les connexines, mais aussi d'observer le transport d'hémicanaux vers l'intérieur des cellules sur de longs filaments nommés microtubules. Nous avons par



Continuellement, les cellules construisent et remodèlent leurs jonctions communicantes *(en bas, à droite)*, ces vastes structures qui leur permettent de communiquer avec leurs voisines. La construction commence par la synthèse de protéines nommées connexines *(1)*, leur arrangement en anneaux – les hémicanaux *(2)* – et l'insertion de ces derniers dans la membrane cellulaire *(3)*. Si un hémicanal rencontre une jonction communicante existante, il peut alors s'amarrer à un hémicanal de la cellule voisine connectée à cet endroit, formant ainsi un nouveau passage entre les cellules *(4)*. Parallèlement, les cellules suppriment et dégradent les canaux les plus anciens, situés au centre des jonctions *(5 et 6)*.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

DES JONCTIONS COMMUNICANTES EN PERPÉTUELLE RÉNOVATION



© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

ailleurs constaté, comme d'autres chercheurs, que de petites jonctions communicantes se combinent parfois pour en former de plus grandes – ce que nos études au microscope électronique suggéraient déjà. Et à l'inverse, lorsque les cellules croissent, se déplacent, se déforment et se divisent, de grandes jonctions communicantes se scindent et en forment de plus petites.

En concevant de nouvelles méthodes de marquage qui permettaient de différencier les nouvelles connexines des anciennes, nos collègues ont montré que les jonctions communicantes s'étendent par l'ajout d'hémicanaux à leur périphérie, de sorte que le centre d'une jonction communicante représente la partie la plus « ancienne » de la plaque. Les composants de cette zone centrale disparaissent à mesure qu'elles vieillissent, ce qui suggère que les jonctions communicantes subsistent grâce à l'afflux de canaux plus récents de la périphérie vers l'intérieur, venant remplacer les plus anciens.

Des kinases aux commandes

Mais la découverte la plus marquante de cette série d'études fut peut-être celle-ci : il arrive qu'une cellule arrache un morceau de sa voisine, un mécanisme que d'autres chercheurs avaient proposé auparavant à partir de clichés de microscopie électronique. Cette manœuvre consiste à ingérer d'un coup les composants de la jonction provenant des deux cellules – un processus qui fournirait un moyen sûr d'interrompre rapidement la communication entre deux cellules lorsqu'elle n'est plus souhaitable. Une telle élimination massive de jonctions communicantes a notamment lieu dans l'utérus après l'accouchement, mettant hors d'action les réseaux de communication qui s'étaient formés pour coordonner les contractions.

Nous savions désormais que les jonctions communicantes se renouvellent constamment. Nous avons donc décidé d'explorer comment les cellules supervisent cette restructuration. Des études préliminaires suggéraient que des protéines nommées kinases régulaient le processus. Les kinases sont capables de modifier l'activité d'une protéine ou sa localisation dans la cellule simplement en lui ajoutant des groupes phosphate (une réaction que l'on nomme phosphorylation).

Le défi était de déterminer si les kinases régulent le comportement des connexines et, si tel est le cas, de mettre en évidence l'effet de la phosphorylation sur leur fonctionnement. Paul Lampe prit la direction de cette série d'études lorsqu'il monta son laboratoire au Centre de recherche sur le cancer Fred Hutchinson à Seattle, en 1994. En isolant la connexine Cx43 et en examinant la protéine par petites sections, Paul Lampe et ses collègues ont découvert que, sur l'ensemble de sa durée de vie, cette connexine est phosphorylée en 15 endroits différents le long de sa queue. Cette information nous a permis de trouver une partie du code de régulation qui contrôle la formation de jonctions communicantes contenant la protéine Cx43. L'action de kinases spécifiques sur certaines parties de la queue de Cx43 augmente l'assemblage de jonctions contenant cette protéine ; d'autres kinases agissant sur des parties différentes de la queue inhibent quant à elles la formation ou l'activité des jonctions ou en limitent la taille.

De nouvelles mutations ont été identifiées et, aujourd'hui, on compte 14 maladies ayant comme origine des défauts dans les connexines des jonctions communicantes

La connaissance d'une partie du code de régulation nous a donné une piste pour explorer les liens entre maladies humaines et jonctions communicantes : dans des échantillons de tissus humains, nous recherchons à présent des indices sur la façon dont des changements de phosphorylation dus à une lésion ou à une maladie modifient l'assemblage et le fonctionnement des jonctions communicantes. Notamment, nous commençons à comprendre, ainsi que d'autres équipes, comment la communication *via* ces jonctions change lorsque des cellules cardiaques essayent de se remettre d'un manque d'oxygène après une crise cardiaque ou lorsque des cellules cutanées se mobilisent pour guérir une coupure ou une éraflure.

Dans les deux cas, l'équipe de Paul Lampe a montré que la phosphorylation augmente sur un site particulier de la queue de la connexine Cx43. Cette phosphorylation accroît brièvement la taille des jonctions communicantes dans ces tissus en empêchant la connexine d'interagir avec une protéine qui, en temps normal, limite l'intégration de nouvelles connexines dans les jonctions existantes. Les jonctions s'étendant plus, la communication entre cellules s'intensifie – ce qui est essentiel au cours des premières minutes qui suivent une lésion – et aide à préserver la fonction du tissu cardiaque ou à faciliter la migration des cellules de la peau jusqu'à une plaie.

Ces découvertes ont conduit au développement de traitements fondés sur la stimulation ou l'inhibition de l'activité des kinases concernées. De telles stratégies nécessitent cependant de la prudence. Une extension des jonctions communicantes à un stade d'une maladie peut se révéler nocive par la suite. Par exemple, en temps normal, bien que les jonctions communicantes s'agrandissent brièvement juste après une blessure, elles sont ensuite vite dégradées, ce qui favorise la guérison. Chez les personnes diabétiques, en revanche, une surproduction continuelle de la protéine Cx43 retarde la cicatrisation d'une blessure. Et en cas d'éraflure de la cornée, il arrive que la production de connexines entraîne une inflammation et la formation d'une lésion persistante au lieu d'une réparation. Dans ces cas, en limitant la production ou la fonction de la protéine Cx43 dans les cellules au voisinage de la blessure chez des rongeurs, on observe une réparation rapide sans cicatrice – une approche sur laquelle travaillent plusieurs sociétés de biotechnologie.

Mais comprendre l'évolution des profils de phosphorylation des connexines lors d'une maladie ou d'une lésion ne suffit pas pour concevoir des thérapies efficaces. Les chercheurs ont besoin de mieux comprendre comment les connexines s'assemblent dans les différents tissus et sous diverses conditions – et comment leur agrégation et leur activité sont perturbées en cas de maladie. L'étude de mutations pathogènes dans les gènes

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

codant les connexines commence à fournir des informations intéressantes dans ce sens.

La première preuve génétique de l'implication de connexines dans une maladie remonte au milieu des années 1990. Plusieurs études ont montré que diverses mutations du gène codant la connexine Cx32 provoquent une forme de la maladie de Charcot-Marie-Tooth, une pathologie neurologique. Dans cette forme, les jonctions communicantes qui habituellement maintiennent la gaine isolante des nerfs disparaissent. Cette gaine, dite de myéline, est constituée de spirales membranaires jointives que des cellules enroulent autour des nerfs. Sans les jonctions, la gaine se dégrade et la conduction nerveuse diminue; cette perte entraîne l'atrophie et l'affaiblissement des muscles, en particulier au niveau des membres.

De la maladie de Charcot à la dysplasie oculo-dento-digitale

Après la découverte que des mutations des connexines ont de graves effets physiologiques, l'intérêt des chercheurs pour les jonctions communicantes a explosé. De nouvelles mutations ont été identifiées et, aujourd'hui, on compte 14 maladies ayant comme origine des défauts dans les connexines des jonctions communicantes.

La caractéristique la plus frappante de ces maladies est leur diversité. Outre la maladie de Charcot-Marie-Tooth, les mutations répertoriées produisent perte d'audition, épilepsie, maladie cardiaque, troubles cutanés, cataracte ou différentes anomalies survenant au cours du développement embryonnaire. Comme on peut s'y attendre, des mutations de connexines différentes contribuent à des maladies distinctes. Toutefois, les connexines mutantes n'affectent pas forcément tous les tissus ou organes de la même façon : lorsqu'une connexine mutante donnée est produite dans deux organes, il arrive que seule la fonction de l'un d'eux soit perturbée.

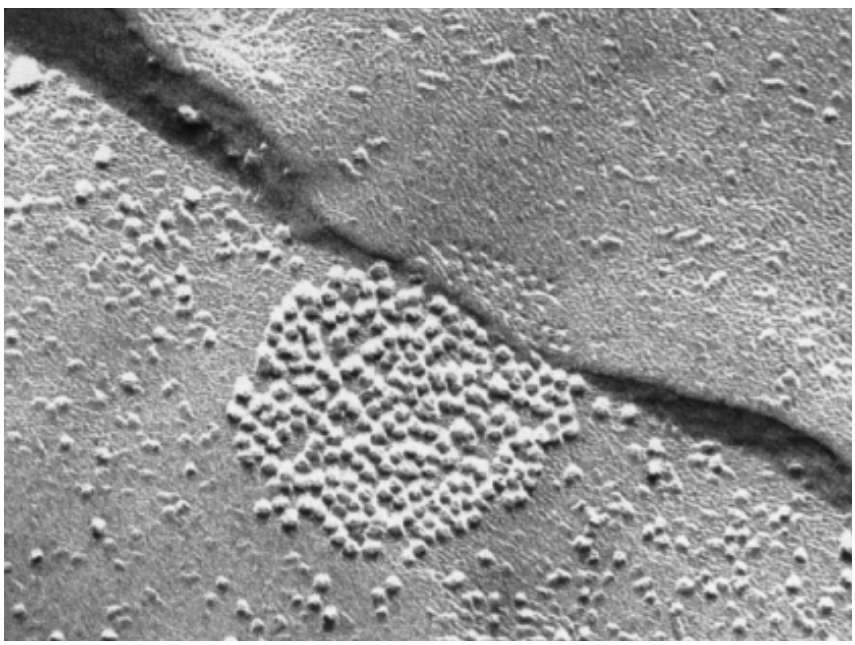
De nombreuses équipes cherchent à comprendre ce phénomène. Une explication serait que dans certains tissus, d'autres connexines normales compensent l'effet d'un variant défectueux, maintenant ainsi une communication suffisante. Ce mécanisme serait absent d'autres tissus. Une connexine donnée pourrait aussi jouer un rôle dans un tissu et remplir des fonctions différentes dans d'autres, selon le cocktail de connexines présent. Les membres de la famille des connexines pourraient également se combiner et produire des canaux hybrides susceptibles de faciliter le passage de divers signaux moléculaires, dont certains seraient plus importants dans un tissu que dans un autre.

Dans le cas de certaines connexines, cependant, les mutations perturbent le fonctionnement de multiples tissus. Par exemple, les personnes atteintes de dysplasie oculo-dento-digitale, une pathologie due à des mutations du gène de la connexine Cx43, présentent un ensemble de symptômes parmi lesquels une microphtalmie (yeux de petite taille), un sous-développement des dents, des malformations du squelette du visage et du crâne, et la fusion de doigts ou d'orteils. Certaines développent en plus une maladie cutanée produisant d'épais cals squameux sur la paume des mains et la plante des pieds. De récentes études sur le cycle de vie des connexines ont apporté quelques indices sur la raison pour laquelle certaines formes de la maladie sont plus graves que d'autres.

Plus de 70 mutations du gène de la protéine Cx43 ont été identifiées chez

À chaque jonction sa fonction

Chez les vertébrés, trois principaux types de jonctions relient les cellules, chacun assurant une fonction spécifique. Les jonctions communicantes créent un passage par lequel circulent de petites molécules et des ions. Les jonctions d'ancrage arriment les cellules les unes aux autres et à la matrice extracellulaire. Enfin, dans les cellules épithéliales (les cellules de la peau et des tissus recouvrant les organes), des jonctions dites serrées maintiennent un contact étanche entre les cellules, ce qui empêche toute molécule de traverser le tapis cellulaire autrement que *via* les cellules elles-mêmes.



CETTE VISION LUNAIRE est une jonction communicante *(au centre)* entre deux cellules, déchirée et observée au microscope électronique à balayage par l'un des auteurs (Ross Johnson) et son équipe en 1978. Les biologistes ont congelé les cellules, puis ont fracturé leur membrane à l'aide d'une lame de rasoir. Dans la cellule à gauche, les hémicanaux de la jonction sont restés dans la membrane, tandis qu'il ne reste que les creux qui hébergeaient ceux de la cellule de droite. La superficie de la jonction est d'environ 0,04 μm^2.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Jonctions communicantes et cancer

Depuis cinquante ans, le lien entre jonctions communicantes et cancer ne fait aucun doute. Toutefois, ces dernières années, le rôle des constituants de ces jonctions, les connexines, dans la cancérogenèse est apparu plus complexe qu'on ne le pensait.

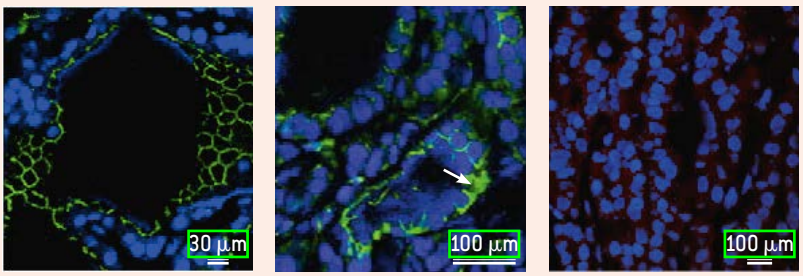
Le premier lien a été établi en 1966 : Werner Loewenstein et Yoshinobu Kanno, de l'université Columbia, à New York, ont montré l'absence de dialogue intercellulaire par jonction communicante dans des tumeurs hépatiques alors que celui-ci existe dans le foie normal. Depuis cette observation, une série d'expérimentations jusqu'à nos jours a confirmé que la perte de ce type de communication accompagne ou favorise l'apparition de tumeurs et leur croissance.

Par exemple, les jonctions communicantes sont souvent réduites, voire absentes, dans les tumeurs solides, quelle que soit leur origine. Par ailleurs, appliquées sur des cultures de cellules, des substances cancérigènes non mutagènes (pesticides, perturbateurs endocriniens) diminuent la communication intercellulaire en réduisant le nombre de jonctions ou en provoquant leur fermeture. En outre, des souris dont les gènes des connexines sont altérés sont plus susceptibles de développer une tumeur induite ou spontanée. À l'inverse, dans d'autres approches où l'on rétablit des jonctions communicantes dans des cellules cancéreuses, par traitement à l'aide de substances chimiopréventives (extraits de thé vert, caroténoïdes...) ou par réintroduction de gènes de connexines, la prolifération cellulaire diminue.

Hormis quelques exceptions notables, toutes les données accumulées depuis 1966 vont dans le même sens : elles suggèrent que les connexines sont des régulateurs négatifs de la prolifération cellulaire. Mais depuis une décennie, leur rôle dans la cancérogenèse se révèle plus complexe. Des études montrent que ces protéines sont aussi capables de favoriser la migration de cellules cancéreuses qui les portent et l'invasion de tissus (mélanomes, gliomes), voire d'agir sur leur dissémination et la destination des métastases (cancer prostatique). Les connexines auraient ainsi un double visage : elles seraient à la fois capables de réduire la prolifération des cellules tumorales, mais aussi d'augmenter leur dissémination.

De nombreuses incertitudes demeurent quant aux mécanismes moléculaires sous-jacents qu'elles contrôlent. Une hypothèse est que ces protéines, ou certaines d'entre elles, seraient capables d'agir sans établir de communication intercellulaire, en interagissant directement avec des protéines à l'intérieur des cellules. Affaire à suivre...

– Marc Mesnil
Laboratoire STIM, ERL 7368, CNRS, université de Poitiers



Les jonctions communicantes disparaissent peu à peu lors de la progression de cancers thyroïdiens, comme le montrent ces images de microscopie à épifluorescence, où la connexine Cx43, détectée à l'aide d'un anticorps, est en vert et où les noyaux des cellules sont colorés en bleu. Dans la thyroïde normale *(à gauche)*, les jonctions communicantes sont nombreuses et tellement riches en Cx43 que son marquage délimite le contour des cellules. Dans des tumeurs bénignes (adénomes, *au centre*), la connexine, moins bien localisée, se retrouve parfois à l'intérieur des cellules *(flèche)*. Elle disparaît complètement dans les cancers *(à droite)*.

des personnes souffrant de la dysplasie oculo-dento-digitale, et nous avons commencé à explorer l'effet de ces mutations sur la protéine et sur la construction des jonctions communicantes. Dale Laird et ses collègues ont ainsi montré que de nombreuses mutations produisent une connexine qui atteint la membrane cellulaire, mais ne forme pas de jonction communicante fonctionnelle : les colorants ne diffusent pas d'une cellule à une autre à travers ces jonctions, ce qui indique que les canaux soit ne sont pas assemblés correctement, soit ne permettent pas le passage des signaux moléculaires. Quoi qu'il en soit, ces mutations diminuent la communication de cellule à cellule.

D'autres mutations empêchent les connexines d'atteindre la membrane cellulaire. Les patients qui les portent souffrent en général de la forme la plus grave de la maladie, qui inclut la maladie cutanée parmi les symptômes. Cela suggère que les hémicanaux de connexines n'interviennent pas que dans l'assemblage des jonctions communicantes. Peut-être jouent-ils un autre rôle à la membrane, ce qui expliquerait pourquoi, lorsque les connexines n'atteignent jamais la membrane, les troubles associés sont plus sévères.

Des canaux isolés ouverts sur l'extérieur

Au lieu de s'assembler par paires et former des canaux, par exemple, certains hémicanaux pourraient rester non appariés, formant de petits canaux isolés qui relieraient les cellules au milieu extérieur. Ces hémicanaux permettraient aux cellules d'émettre des signaux vers leur environnement ou d'y prélever des molécules. Ces molécules seraient peut-être différentes de celles qui passent habituellement à travers les canaux des jonctions communicantes.

Une telle activité a été observée expérimentalement, notamment dès 1996 avec la connexine Cx46, ce qui ajoute une nouvelle dimension à notre compréhension du rôle des connexines dans la communication entre cellules. Les chercheurs poursuivent l'étude des hémicanaux mutants, avec l'espoir de trouver de nouvelles cibles (notamment les molécules jusqu'ici non identifiées qui traversent les hémicanaux non appariés) pour le traitement de la dysplasie oculo-dento-digitale ou d'autres maladies dues à des connexines défectueuses.

M. Mesnil ; Pavel Ilya ; Laboratoire STIM ; Kramps ; Pr Levillain, CHU de Poitiers

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

L'étude de l'impact des mutations sur l'assemblage des jonctions communicantes et sur leur fonctionnement pourrait aussi conduire à des thérapies hautement ciblées, qui contreraient les conséquences d'une mutation sans provoquer de graves effets indésirables. Par exemple, le fait qu'une mutation donnée perturbe l'assemblage d'une jonction communicante, mais pas le transport des connexines vers la surface cellulaire, ouvre une piste pour concevoir un médicament qui rendrait la connexine à nouveau capable de former un canal fonctionnel. De telles thérapies ciblées fourniraient un moyen de rétablir la communication entre cellules sans avoir à remplacer la connexine mutante par une protéine fonctionnelle – une opération nécessitant une thérapie génique, une approche encore risquée et expérimentale.

Mais la découverte de mutations des connexines à l'origine de maladies apporte bien plus que des cibles thérapeutiques prometteuses. Elle fournit un nouvel ensemble d'outils pour l'étude de la biologie des jonctions communicantes. Par exemple, notre compréhension des molécules qui les traversent reste très limitée. Dans le cas des cellules cardiaques, nous savons que les ions qui circulent *via* ces jonctions transmettent un signal électrique d'une cellule à une autre. Mais nous n'avons aucune idée de la nature du message véhiculé entre les cellules de l'appareil auditif ou entre celles qui interviennent dans la cicatrisation d'une lésion cutanée. En poursuivant l'étude des hémicanaux et de leurs liens avec des maladies, nous serons un jour en mesure d'aborder les questions fondamentales ultimes concernant cette forme de communication : que se chuchotent les cellules et comment ces messages moléculaires gouvernent-ils l'assemblage et le fonctionnement d'organismes aussi complexes que l'humain ? ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Aasen *et al.*, **Gap junctions and cancer : Communicating for 50 Years**, *Nature Reviews Cancer*, vol. 16(12), pp. 775-788, 2016.

J. L. Solan et P. D. Lampe, **Specific Cx43 phosphorylation events regulate gap junction turnover *in vivo***, *FEBS Letters*, vol. 588, pp. 1423-1429, 2014.

R. G. Johnson *et al.*, **Gap junction assembly : Roles for the formation plaque and regulation by the C-terminus of connexin43**, *Molecular Biology of the Cell*, vol. 23(1), pp. 71-86, 2012.

K. Jordan *et al.*, **Trafficking, assembly and function of a connexin43-green fluorescent protein chimera in live mammalian cells**, *Molecular Biology of the Cell*, vol. 10(6), pp. 2033-2050, 1999.

© JOE FOSTER

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Comment **les ailes** sont venues aux dinosaures

Stephen Brusatte

Les fossiles de dinosaures à plumes du Liaoning, en Chine, révèlent que la transformation de certains dinosaures en oiseaux a été longue. Et que les premières plumes n'avaient rien à voir avec la capacité de voler.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Pékin, six heures du matin. Par une froide journée de novembre, je me fraye un chemin dans la gare vers un train bondé. Je me rends à Jinzhou, ville de trois millions d'habitants située aux confins du nord-est de la Chine. Plus tard, tandis que le train serpente parmi les usines en béton et les champs de maïs embrumés, je tente de récupérer un peu de sommeil, mais je suis trop excité pour y parvenir. Je fais ce long voyage pour voir un extraordinaire fossile découvert par hasard par un paysan. D'après les bruits qui courent, il est incroyable.

Quatre heures passent et me voilà à nouveau en train de marcher dans une gare : celle de Jinzhou. Je suis à la traîne de Junchang Lü, un célèbre chasseur de dinosaures de l'Académie chinoise des sciences géologiques, qui a sollicité mon aide. Un petit groupe de dignitaires nous accueille avant de nous amener au muséum de la cité, installé dans un bâtiment délabré. Avec un sérieux digne d'une réunion politique au sommet, notre groupe emprunte un long couloir et pénètre dans une pièce où une plaque rocheuse repose sur une petite table. Je me retrouve face à l'un des plus beaux fossiles que j'ai jamais vus : un squelette à peu près grand comme un âne, et d'une couleur chocolat qui contraste avec le calcaire gris dans lequel il est enchâssé *(voir la photographie page ci-contre)*.

L'animal, manifestement un dinosaure, a des dents ressemblant à des couteaux à viande, des griffes acérées et une longue queue. Aucun doute : il s'agit d'un proche cousin de *Velociraptor*, ce dangereux prédateur popularisé par le film *Jurassic Park*. Cependant, le spécimen chinois diffère notablement de ce dinosaure relativement ordinaire qu'est *Velociraptor*. Ses os sont légers et creux ; ses pattes sont longues et étroites comme celles d'un héron. Son corps devait être recouvert de divers types de plumes, notamment sur les bras, où des pennes de grande taille s'empilaient et formaient des ailes. Ce dinosaure ressemblait étonnamment à un oiseau !

Un an plus tard, Junchang Lü et moi avons nommé cette nouvelle espèce *Zhenyuanlong*. Il s'agit du dernier des nombreux dinosaures à plumes découverts au cours des vingt dernières années dans la province chinoise du Liaoning. Or le remarquable registre fossile constitué par toutes ces découvertes illustre la façon dont certains dinosaures ont évolué et donné naissance aux oiseaux.

Les implications de ces fossiles sont capitales, car, depuis Darwin, les paléontologues s'interrogent sur la façon dont l'évolution fait apparaître des classes entières de nouveaux animaux. Le phénomène se produit-il rapidement, à la faveur de quelque bizarre innovation de rupture ? Ou peu à peu sur plusieurs millions d'années, à mesure que les formes de vie s'adaptent à de nouvelles conditions environnementales ? *Zhenyuanlong* et les fossiles du Liaoning nous éclairent sur ces questions dans le cas des oiseaux.

Élucider l'origine des oiseaux

De très nombreux traits séparent aujourd'hui les oiseaux des autres animaux. Outre ceux liés au vol, ces organismes ont un métabolisme élevé, qui leur permet une croissance spectaculairement rapide ; leurs cerveaux relativement gros les dotent d'une bonne intelligence et de sens développés. En réalité, les oiseaux sont tellement particuliers que les paléontologues se sont longtemps interrogés sur leur origine.

C'est le biologiste anglais Thomas Henry Huxley qui, dans les années 1860, a proposé une réponse à la question. C'était un ami de Darwin et l'un de ses plus fervents soutiens. Quelques années seulement après la publication de l'œuvre majeure de Darwin (*De l'origine des espèces*) en 1859, des carriers bavarois ont découvert qu'une plaque de calcaire qu'ils venaient de fendre contenait un curieux squelette. Doté de griffes acérées et d'une longue queue reptilienne, l'animal avait aussi des bras emplumés. Des ailes ? Huxley remarqua que la forme en question – que l'on nomma *Archaeopteryx*, soit l'« oiseau archaïque » – ressemblait beaucoup à de petits dinosaures carnivores tels que *Compsognathus*, qui commençaient aussi à être mis au jour. Il avança donc l'idée, radicale en son temps, que les oiseaux descendaient des dinosaures. Les autres biologistes n'étaient pas d'accord. Le débat a duré plus d'une centaine d'années.

La question fut finalement tranchée par la découverte de nouveaux fossiles. Au milieu des années 1960, dans l'ouest de l'Amérique du Nord, le paléontologue John Ostrom mit au jour *Deinonychus*, un

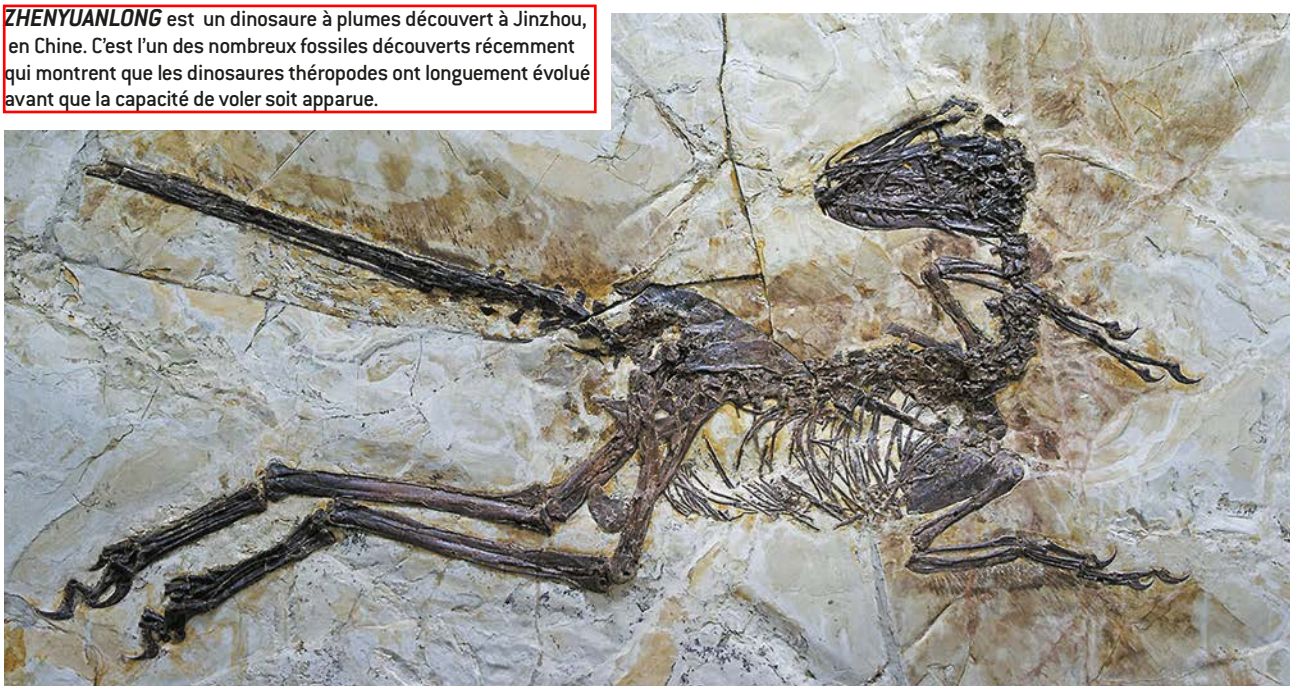
L'ESSENTIEL

- Depuis la découverte de dinosaures à plumes, il est établi que les oiseaux sont issus des dinosaures théropodes.
- Les nombreux fossiles de tels dinosaures révèlent comment de lourds monstres terrestres se sont mués en petits animaux volants.
- Ils indiquent aussi que les plumes ont d'abord servi à préserver la chaleur du corps et à l'apparat, et que la capacité de voler n'est venue qu'après.

L'AUTEUR

Stephen BRUSATTE est paléontologue à l'université d'Édimbourg, en Écosse. Il étudie l'évolution sur de longues échelles de temps de grands groupes d'animaux tels que les dinosaures et les oiseaux.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



ZHENYUANLONG est un dinosaure à plumes découvert à Jinzhou, en Chine. C'est l'un des nombreux fossiles découverts récemment qui montrent que les dinosaures théropodes ont longuement évolué avant que la capacité de voler soit apparue.

Tiré de Lu et S. Brusatte Scientific Reports vol 5 article 11775 14 juin 2015

dinosaure de forme étonnamment proche de celle d'un oiseau. Ses longs bras ressemblent beaucoup à des ailes ; sa structure, qui suggère l'agilité, est révélatrice d'un animal actif et énergique. Ostrom avança que *Deinonychus* avait peut-être des plumes. Après tout, si les oiseaux sont issus des dinosaures – ce qu'entre-temps de nombreux paléontologues commençaient à accepter –, les plumes devaient être apparues quelque part sur cette trajectoire évolutive. Mais Ostrom ne pouvait en être sûr, car il ne disposait que des os de l'animal. Les chairs et les parties molles, telles les plumes, ne résistent en effet que très rarement à la fossilisation.

Un dinosaure à duvet

Ostrom prit son mal en patience. Il continua à chercher le Graal paléontologique qui prouverait sans le moindre doute le lien entre les dinosaures et les oiseaux : un squelette de dinosaure ayant conservé des traces de plumage. En 1996, alors que sa carrière tirait à sa fin et qu'il participait au congrès annuel de la Société de paléontologie des vertébrés à New York, Philip Currie l'aborda. Ce paléontologue, aujourd'hui à l'université de l'Alberta, s'intéressait aussi aux dinosaures aviformes. Il revenait de Chine, où il avait eu vent d'un fossile extraordinaire, dont il rapportait une photographie. Ostrom y découvrit un petit dinosaure entouré d'un halo duveteux, admirablement bien conservé par l'épaisse couche de cendres volcaniques qui l'avait enseveli aussi brusquement que le Vésuve avait fait disparaître Pompéi. Ostrom en pleura d'émotion : quelqu'un avait enfin trouvé son dinosaure à plumes !

Nommé ensuite *Sinosauropteryx*, le fossile montré par Philip Currie à Ostrom inaugurait une spectaculaire série de découvertes. Tels des prospecteurs avides d'or, les paléontologues se ruèrent en masse dans le Liaoning et constatèrent que seuls les paysans locaux savaient où chercher. Deux décennies après la découverte de *Sinosauropteryx*, plus de 20 espèces de dinosaures à plumes ont aujourd'hui été mises au jour dans cette région de Chine. Ils vont de cousins primitifs du *Tyrannosaurus rex*, longs de neuf mètres et couverts d'une sorte de pelage en duvet, à des herbivores de la taille d'un chien, hérissés de pointes comme un porc-épic, en passant par des planeurs de la taille d'un corbeau dotés de vraies ailes. Ces fossiles de dinosaures à plumes sont extrêmement célèbres.

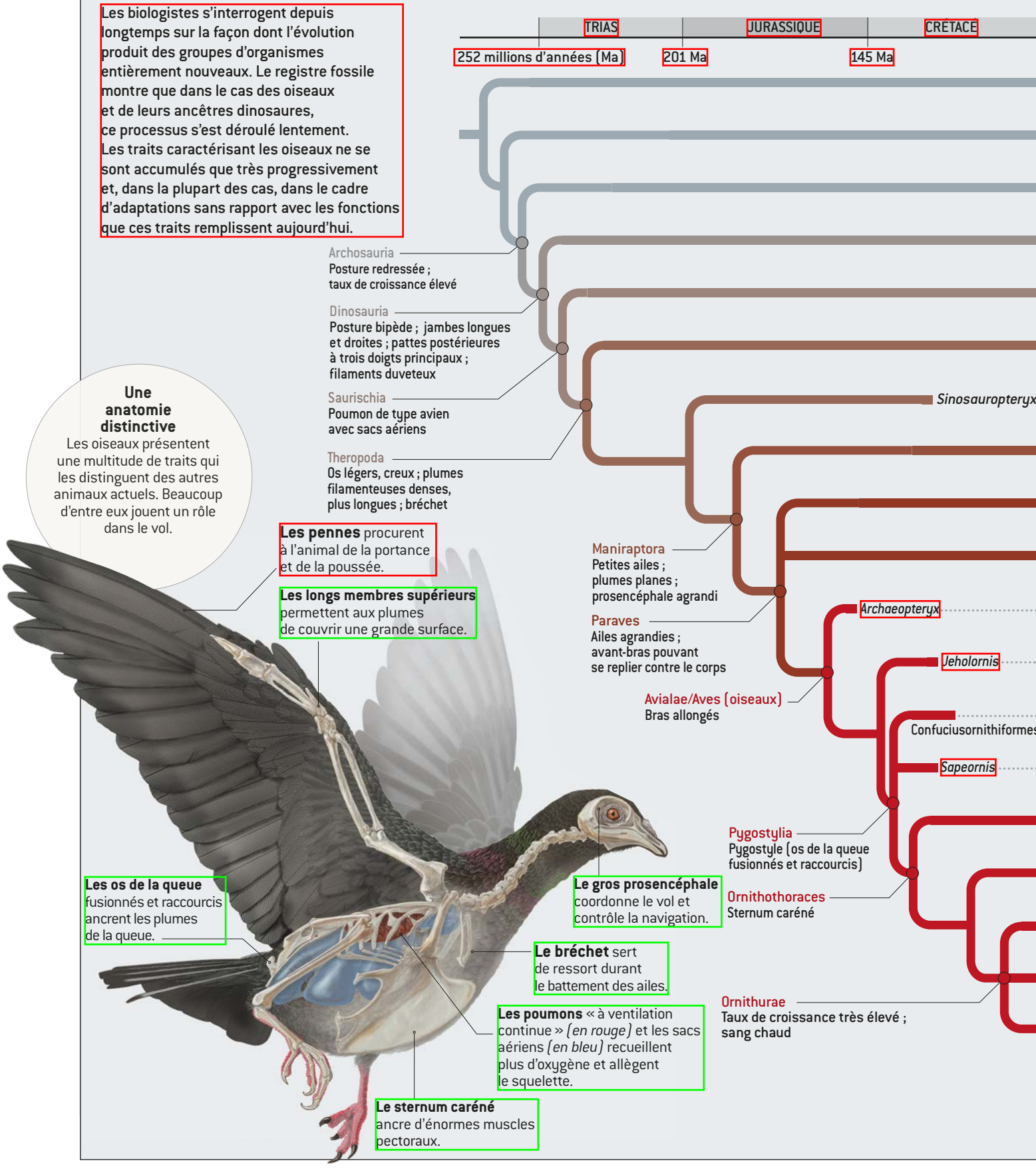
Les dinosaures à plumes du Liaoning le confirment : les oiseaux sont issus des dinosaures. Cette phrase est peut-être un peu trompeuse, car elle laisse penser que les dinosaures et les oiseaux sont deux groupes totalement distincts. En réalité, les oiseaux *sont* des dinosaures ; ils constituent l'un des nombreux groupes d'animaux qui descendent de l'ancêtre commun des dinosaures. En d'autres termes, ce sont des dinosauriens, au même titre que les bien connus *Triceratops* et *Brontosaurus*. Cela peut paraître étonnant, mais on peut se dire que les oiseaux sont des dinosaures aberrants, car capables de voler, exactement de la même façon que les chauves-souris sont des mammifères aberrants parce qu'elles volent.

Les fossiles du Liaoning éclairent la généalogie des oiseaux en indiquant à quel niveau leurs lignées apparaissent sur l'arbre phylogénétique des dinosaures. Les oiseaux constituent en effet un clade de dinosaures (un clade est un groupe de taxons (d'espèces) partageant un ancêtre commun), qui fait partie du clade des théropodes. Le nom de ces dinosaures carnivores réunit deux racines grecques traduisant l'idée d'« animaux à pieds de bêtes sauvages ». *T. rex*, *Allosaurus* ou encore *Spinosaurus* sont des théropodes, mais du genre massif. Cependant, les théropodes proches des oiseaux constituent un clade d'animaux de petite taille particulièrement agiles et intelligents, nommé Maniraptora. Popularisés sous le terme de raptors dans le film *Jurassic Park*, ce clade comprend notamment *Velociraptor*, *Deinonychus* (révélé par Ostrom) et *Zhenyuanlong*. C'est donc quelque part au sein de cette foule de théropodes à plumes que se trouve la ligne de démarcation entre « oiseaux » et « non-oiseaux ».

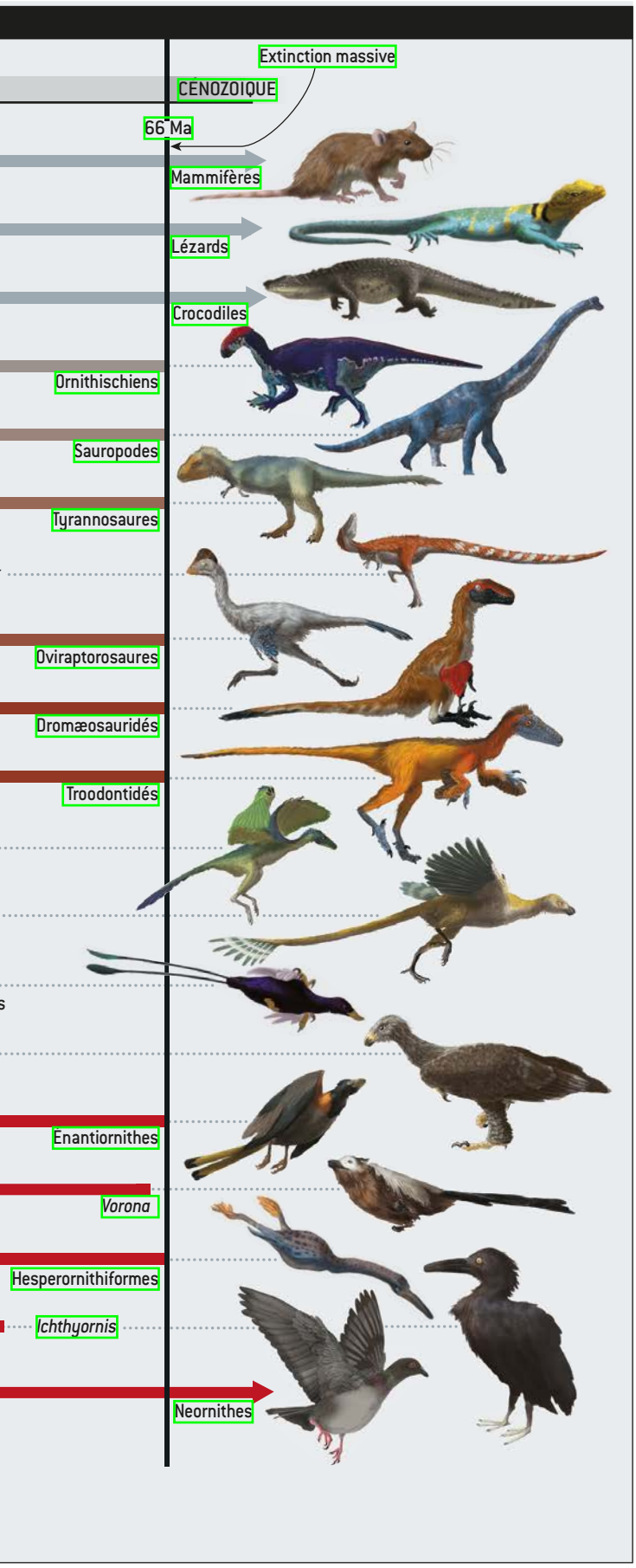
Nous disposons aujourd'hui de tellement de dinosaures à plumes du Liaoning et d'ailleurs que leur ensemble fournit le

UNE TRANSFORMATION GRADUELLE

Les biologistes s'interrogent depuis longtemps sur la façon dont l'évolution produit des groupes d'organismes entièrement nouveaux. Le registre fossile montre que dans le cas des oiseaux et de leurs ancêtres dinosaures, ce processus s'est déroulé lentement. Les traits caractérisant les oiseaux ne se sont accumulés que très progressivement et, dans la plupart des cas, dans le cadre d'adaptations sans rapport avec les fonctions que ces traits remplissent aujourd'hui.



© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



© Illustrations : Pour la Science, d'après Xu Xing, Zhan Hu, Yang Zhi, Zhou Zhonghe, Chen Chinshanson, Cadoprannie

meilleur des aperçus sur l'une des plus remarquables transitions évolutives de l'histoire de la vie. Pour étudier ces fossiles, les chercheurs commencent par en réaliser des images tridimensionnelles par tomographie à rayons X (ou scanner 3D). Ils se livrent ensuite à de savantes analyses informatiques afin de les placer dans des arbres de parenté. Des programmes de simulation permettent aussi de reconstituer leur biomécanique. Et des techniques statistiques élaborées aident à retracer l'apparition au cours de l'évolution de nouveaux traits ou de nouvelles espèces. C'est ainsi que nous sommes parvenus à établir par quelle trajectoire évolutive certains dinosaures se sont transformés en oiseaux.

Ces productions cornées de la peau que sont les plumes

Au centre de l'énigme de l'apparition des oiseaux figure la question de l'origine de ces productions cornées de la peau que sont les plumes. Celles-ci sont aux oiseaux ce que les cheveux gominés et les rouflaquettes étaient à Elvis Presley : un signe distinctif incontournable ! Au premier coup d'œil sur les longues rémiges d'un aigle ou sur la queue bariolée d'un paon, nous savons qu'il s'agit d'un oiseau. En effet, les oiseaux sont les seuls animaux dotés de plumes. Des attributs loin d'être anodins : ce sont des outils polyvalents qui rendent le vol possible, aident à séduire une femelle ou à intimider un rival, retiennent la chaleur corporelle, isolent et protègent les œufs pendant la couvaison… Les plumes ont tellement d'usages qu'il a été difficile de comprendre quelle a été leur première fonction sélectionnée par l'évolution.

Grâce à *Sinosauropteryx* et aux autres fossiles du Liaoning, nous sommes en tout cas certains d'une chose : les plumes ne sont pas subitement apparues avec les premiers oiseaux, mais beaucoup plus tôt, chez leurs lointains ancêtres dinosauriens. Il est même possible que l'ancêtre commun de tous les dinosaures ait eu quelque sorte de plumes. Mais les toutes premières plumes différaient beaucoup des pennes qui nous sont familières chez les oiseaux modernes. Le plumage de *Sinosauropteryx* et de nombreux autres dinosaures ressemblait plutôt à un duvet constitué de milliers de filaments comparables à des poils. Les dinosaures équipés d'un tel plumage ne pouvaient absolument pas voler : leurs plumes ne s'y prêtaient pas et ils n'avaient même pas d'ailes. Ces premières plumes ont été sélectionnées parce qu'elles apportaient probablement un autre avantage adaptatif : l'isolation thermique.

Chez la plupart des dinosaures, un revêtement de téguments duveteux suffisait. Au sein du clade des théropodes maniraptoriens, un nouveau type de couverture corporelle s'est peu à peu développé : les filaments se sont d'abord allongés, puis se sont ramifiés – initialement en touffes, puis de façon de plus en plus ordonnée – de part et d'autre d'une tige centrale. Une fois les barbes complétées de barbules selon un réseau plan et régulier, la penne, c'est-à-dire la « plume d'oie » que nous avons tous en tête, était née. Alignées et disposées en couches sur les bras, ces plumes plus complexes ont fini par former des ailes. De la taille d'un corbeau, le dinosaure *Microraptor* du Liaoning décrit en 2003 par Xu Xing, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, avait aussi des « ailes » sur ses pattes et sa queue, un plan d'organisation inconnu chez tous les oiseaux modernes *(voir l'illustration page 60)*.

Pourquoi du duvet s'est-il transformé en plumes structurées ? La première idée qui se présente à l'esprit est que le corps des

maniraptoriens serait devenu apte à planer, et la portance associée à leurs membres aurait favorisé le développement des ailes.

Cependant, l'étude attentive du registre fossile suggère une autre trajectoire évolutive. Il semble que plusieurs petits animaux ailés, tel *Microraptor*, étaient capables de planer, comme le suggèrent les expériences en soufflerie et les simulations de Gareth Dyke de l'université de Debrecen en Hongrie. Mais d'autres, tels que *Zhenyuanlong*, avaient un corps lourd doté de petits bras, et étaient incapables de décoller. En outre, aucun de ces dinosaures ailés n'était équipé des énormes muscles pectoraux nécessaires au vol. Et peu d'entre eux avaient des pennes asymétriques dotées d'un bord d'attaque (celui où le flux d'air aborde la plume) et d'un bord de fuite (le flux d'air y quitte la plume), capables de résister aux intenses forces aérodynamiques engendrées par le vol.

Les recherches récentes suggèrent que les ailes ont d'abord été des attributs sexuels. Ainsi, Jakob Winter, de l'université de Bristol en Angleterre, a réussi à identifier au microscope les structures porteuses de pigments, les «mélanosomes», dans les plumes fossiles. On a ainsi montré que le plumage des dinosaures non aviens (ne volant pas) présentait tout un spectre de couleurs. Certaines des plumes étaient mêmes iridescentes, c'est-à-dire qu'elles changeaient de couleur selon l'angle d'observation, comme c'est le cas chez de nombreux oiseaux actuels. De tels habits de parade devaient être précieux pour séduire une partenaire potentielle.

La splendeur manifeste de ces plumes de dinosaures a donc suggéré une nouvelle hypothèse quant à l'origine des ailes : elles auraient été initialement sélectionnées parce qu'elles constituaient un message coloré bien visible. Peu à peu, certains dinosaures à plumes se seraient ensuite retrouvés avec des surfaces suffisamment étendues pour créer de la portance aérodynamique.

Le vol serait apparu fortuitement

En d'autres termes, la capacité de planer, puis de voler, serait apparue fortuitement. Un événement qui a très bien pu se produire à plusieurs reprises et parallèlement, quand des maniraptoriens de lignées différentes se sont mis à exploiter la portance qu'engendraient leurs bras ailés pour bondir et se percher en hauteur, pour sauter d'une branche à l'autre, voire pour s'élancer du haut d'un arbre. Finalement, des membres d'une de ces lignées ont acquis des traits adaptés au vol : une plus petite taille, des bras très allongés, de puissants muscles pectoraux, une large queue de plumes qui a remplacé leur longue queue. Ce sont eux qui ont donné les oiseaux actuels.

Les plumes et les ailes s'inscrivent dans un cadre bien plus vaste que celui de l'évolution du vol. Les dinosaures si bien conservés du Liaoning montrent que de nombreuses caractéristiques singulières des oiseaux sont apparues des millions d'années avant les oiseaux et pour des raisons sans rapport aucun avec le vol.

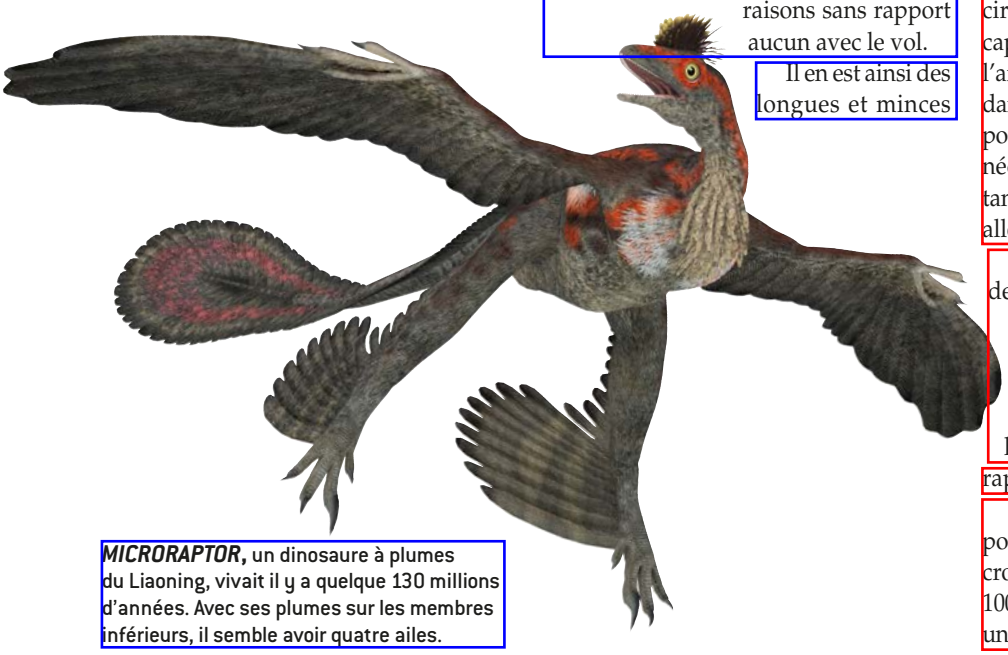
Il en est ainsi des longues et minces pattes se terminant par trois doigts, l'un des traits les plus caractéristiques des oiseaux actuels. Le registre fossile montre que ce trait est apparu il y a plus de 230 millions d'années chez des dinosaures très primitifs. Cette émergence semble avoir fait partie d'un remodelage général du corps de certains dinosaures, qui a transformé ces derniers en animaux bipèdes courant très vite pour distancer des prédateurs ou rattraper des proies. Cette forme des membres inférieurs fait partie des caractéristiques des dinosaures expliquant qu'ils aient pu régner aussi longtemps.

Chez certains de ces dinosaures – les tout premiers membres de la dynastie des théropodes –, les clavicules gauche et droite ont fusionné pour constituer une nouvelle structure, le bréchet. Un changement apparemment mineur, mais qui a stabilisé la ceinture scapulaire (les os qui relient les membres supérieurs à la colonne vertébrale), ce qui a permis à ces prédateurs furtifs de mieux encaisser les contre-chocs se produisant lors de la saisie des proies. Les oiseaux, leurs descendants, ont profité de la présence du bréchet, puisque celui-ci se déforme comme un ressort et stocke de l'énergie dans les battements d'ailes.

Deux autres éléments jouant un rôle important dans le vol sont la croissance rapide des oiseaux et leurs os creux. Ces traits si caractéristiques des oiseaux ont aussi une origine profondément dinosaurienne. Beaucoup de dinosaures avaient en effet des os creux où se logeaient des sacs aériens, révélateurs de poumons à circulation continue ultra-efficaces, car capables de prélever de l'oxygène dans l'air tant pendant l'inspiration que pendant l'expiration. C'est du reste ce type de poumon qui fournit aux oiseaux l'énergie nécessaire à leur mode de vie exigeant, tandis que les vides internes de leurs os allègent leur squelette pour le vol.

En étudiant la structure microscopique des os de dinosaures, nous avons appris que ces premiers théropodes avaient des vitesses de croissance et des physiologies intermédiaires entre les reptiles, à croissance lente et à sang froid, et les oiseaux d'aujourd'hui, à croissance rapide et à sang chaud.

Ainsi, on sait maintenant qu'un poumon « à ventilation continue » et une croissance rapide sont apparus plus de 100 millions d'années avant les oiseaux, à une époque où apparaissaient les premiers



MICRORAPTOR, un dinosaure à plumes du Liaoning, vivait il y a quelque 130 millions d'années. Avec ses plumes sur les membres inférieurs, il semble avoir quatre ailes.

© Shutterstock.com/caimanda

dinosaures aux longues jambes, très différents des amphibiens, des lézards et des crocodiles. Plus rapides que ces animaux avec lesquels ils concourraient, ces boules d'énergie ont alors conquis de nouvelles niches écologiques.

La petite taille des oiseaux – qui n'a rien à voir avec celle, massives, de *T. rex* et compagnie – est elle aussi apparue au sein de lignées bien antérieures aux oiseaux. Mike Lee, de l'université Flinders en Australie, et Roger Benson, de l'université d'Oxford, ont établi indépendamment que la gracilité et la petite taille des oiseaux sont le résultat d'une réduction progressive, qui a débuté avec les maniraptoriens et a duré plus de 50 millions d'années. On ne sait pas exactement ce qui l'a déclenchée, mais une possibilité serait que le rapetissement des dinosaures à plumes leur ait donné accès à de nouvelles niches écologiques – arbres, broussailles, peut-être même grottes ou terriers – inaccessibles aux géants tels que *Brontosaurus* et *Stegosaurus*.

La gracilité et la petite taille des oiseaux sont le résultat d'une réduction progressive, qui a duré plus de 50 millions d'années

On peut également faire remonter aux dinosaures certains traits neurologiques et comportementaux des oiseaux actuels. De nombreuses étapes clés de l'histoire de ces traits ont été découvertes dans le désert de Gobi, en Mongolie. Au cours du dernier quart de siècle, une équipe conjointe du Muséum américain d'histoire naturelle et de l'Académie mongole des sciences, dirigée notamment par Mark Norell et par Mike Novacek, a rassemblé de nombreux fossiles significatifs à cet égard.

La plupart remontent au Crétacé supérieur, il y a entre 84 millions et 66 millions d'années. Ils livrent un nombre exceptionnel de détails sur la vie des dinosaures et des premiers oiseaux. On trouve notamment toute une série de crânes bien conservés de *Velociraptor* et d'autres maniraptoriens à plumes. Réalisées par Amy Balanoff de l'université Stony Brook, les tomographies à rayons X de ces spécimens révèlent que ces espèces avaient un volumineux cerveau dont la partie antérieure était étendue.

Le gros prosencéphale des oiseaux est ce qui explique leurs remarquables capacités cognitives. C'est en son sein que se loge l'« ordinateur de vol », en d'autres termes les circuits neuronaux grâce auxquels les oiseaux contrôlent si bien leurs déplacements dans les trois dimensions. Les chercheurs ignorent encore pourquoi les maniraptoriens ont acquis plus d'intelligence, mais les fossiles montrent clairement que cela s'est produit bien avant l'apparition du vol.

Le plan d'organisation des oiseaux s'est donc construit en de nombreuses petites étapes. La transition entre dinosaures et oiseaux ne s'est pas produite d'un seul coup, mais plutôt au cours de dizaines de millions d'années d'évolution graduelle.

Cette transition a d'ailleurs été si progressive qu'il n'existe pas de distinction claire entre « oiseaux » et « non-oiseaux ». C'est ce que j'ai mis en évidence en 2014 pendant ma thèse de doctorat (sous la direction de Mark Norell) par des techniques statistiques. En plus de ses 25 ans de recherche dans le désert de Gobi, Mark Norell a travaillé avec plusieurs vagues d'étudiants de troisième cycle pour établir de façon de plus en plus détaillée les arbres de parenté des dinosaures.

Avec nos collègues Greene Lloyd, de l'université de Leeds en Angleterre, et Steve Wang, du Swarthmore College, Mark Norell et moi avons compilé les données concernant plus de 850 caractéristiques du squelette de quelque 150 théropodes qui couvrent la transition dinosaures-oiseaux. Nous avons ensuite utilisé les statistiques à variables multiples pour placer chaque espèce dans un espace morphologique – une carte qui regroupe les espèces en fonction des pourcentages de traits communs.

Sur une telle carte, deux espèces très semblables anatomiquement se retrouvent très proches l'une de l'autre, comme Paris et Créteil sur une carte géographique ; deux espèces aux squelettes très différents se retrouvent loin l'une de l'autre, comme Paris et Strasbourg sur la même carte. Si les oiseaux ont évolué par une série de mutations rapides et spectaculaires à partir de certains dinosaures, alors les deux groupes auraient dû se retrouver sur deux zones distinctes de la carte. Au lieu de cela, l'espace morphologique que nous avons obtenu s'est révélé beaucoup plus désordonné : les oiseaux s'y trouvaient

dispersés au milieu d'un grand nuage de dinosaures. Aucune démarcation nette n'étant perceptible, on en déduit que la transition entre oiseaux et dinosaures a été lente au point d'en être imperceptible.

Les oiseaux sont donc un groupe particulier de dinosaures. Si, il y a quelque 125 millions d'années, je m'étais trouvé en ce lieu qui allait devenir Jinzhou, en train d'observer *Zhenyuanlong* battre frénétiquement des ailes pour essayer d'échapper au nuage de cendres volcaniques qui allait l'ensevelir, il m'aurait fait l'impression d'un grand oiseau.

Dans le même temps, j'aurais pensé que dinosaures et oiseaux sont en gros des animaux du même type. Le fait que l'on classe *Zhenyuanlong* parmi les dinosaures et non parmi les oiseaux est affaire de convention : pour les paléontologues, les oiseaux font traditionnellement partie du clade de l'*Archaeopteryx* de Huxley – en d'autres termes, de petits animaux dotés d'ailes pleinement évoluées et aptes au vol. Puisque les dromæosauridés, dont fait partie *Zhenyuanlong*, occupent une branche extérieure de l'arbre de parenté des oiseaux, on tend à penser qu'ils n'en font pas partie.

Nous ne devrions cependant pas sous-estimer les oiseaux. Oui, ce sont bien des dinosaures ; non, ils ne constituent pas une classe à part. Toutefois, ce sont des dinosaures remarquables, et ils ont adopté un mode de vie qui les a fait prospérer. Les quelque 10 000 espèces actuelles d'oiseaux représentent en effet une spectaculaire diversité de formes, qui va des oiseaux-mouches aux autruches. Qui plus est, les oiseaux ont été capables de survivre aux catastrophes de la fin de Crétacé, il y a quelque 66 millions d'années, ce qui n'a pas été le cas des autres dinosaures.

Il est fascinant de penser que, bien avant les oiseaux, un grand nombre de sélections et d'adaptations ont été à l'œuvre des dizaines de millions d'années durant, dont sont issus les théropodes non aviens, puis les théropodes aviens (les oiseaux). Si quelqu'un parmi nous avait pu être témoin de ce long processus évolutif, il n'aurait pas vu venir le fait que l'accumulation de traits aidant ces dinosaures à garder la chaleur de leur corps ou à attirer un partenaire sexuel conduirait un jour à des organismes volants.

L'évolution n'a pas d'objectif ; elle n'agit que sur ce qui est disponible sur le moment, elle est influencée par les incessantes et toujours changeantes pressions de l'environnement et de la compétition. Il n'y a pas eu de moment où un dinosaure est devenu oiseau, une sorte d'explosion biologique qui aurait transformé un *T. rex* en poule.

La longue évolution qui a abouti aux oiseaux se compare davantage à une épopée qu'à une rupture. Il en va de même pour le long processus qui a conduit de certains poissons à quatre nageoires aux tétrapodes (à quatre membres) terrestres que nous sommes. Dotés de doigts, les tétrapodes ont donné des formes aussi différentes que les mammifères terrestres, dont certains se sont transformés en baleines, et les primates arboricoles, dont certains se sont transformés en humains bipèdes. Plus les chercheurs en apprennent sur les transitions évolutives majeures, plus ils concluent qu'elles n'ont rien d'un sprint et tout du marathon.

L'évolution des oiseaux, une longue saga

L'évolution des oiseaux est donc une saga, dont un aspect supplémentaire mérite d'être mentionné. L'étude statistique que nous avons effectuée pourrait aussi expliquer comment les oiseaux ont survécu à l'extinction de masse qui a emporté tous les dinosaures, sauf eux, à la fin du Crétacé. Une partie de notre travail a consisté à mesurer la vitesse à laquelle les caractéristiques du squelette des oiseaux et de leurs cousins dinosaures ont changé, ce qui est un reflet de leur vitalité évolutive.

Les résultats nous ont plus que surpris : les premiers oiseaux qui côtoyaient les autres dinosaures évoluaient extrêmement vite, nettement plus que *Velociraptor*, *Zhenyuanlong* et les autres espèces de dinosaures non aviens. Il semble qu'avec l'apparition du premier petit dinosaure capable de voler, un énorme potentiel évolutif s'est débloqué. Désormais, les dinosaures se déplaçant dans les trois dimensions de l'espace avaient accès à une myriade de nouvelles niches écologiques. Et alors que leurs cousins terrestres n'ont pu faire face aux catastrophes de la fin du Crétacé, les oiseaux ont traversé en volant les régions ravagées – et ont trouvé tout un nouveau monde, vidé de ses anciens habitants, à conquérir. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Lü et S. L. Brusatte, **A large, short-armed, winged dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the early Cretaceous of China and its implications for feather evolution**, *Scientific Reports*, vol. 5, article 11775, 2015.

S. L. Brusatte *et al.*, **Gradual assembly of avian body plan culminated in rapid rates of evolution across the dinosaur-bird transition**, *Current Biology*, vol. 24(20), pp. 2386-2392, 2014.

R. Prum et A. Brush, **Les plumes de dinosaures**, *Dossier Pour la Science* n° 48, juillet-septembre 2005.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

Plus de 24% de réduction

OFFRE DÉCOUVERTE

12 nos par an

4,90€ PAR MOIS SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS475

❑ **OUI**, je m'abonne à *Pour la Science* **formule Découverte.** Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(DPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON
et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/08/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville _____

Date et signature

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

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

GROUPE POUR LA SCIENCE - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 15 - APE 58.14 Z

Le paradoxe de Huntington

Chiara Zuccato et Elena Cattaneo

Le gène à l'origine de la maladie de Huntington, une maladie neurodégénérative dévastatrice, a joué un rôle crucial dans l'évolution de notre système nerveux.

Il y a quinze ans, les assureurs britanniques ont convenu de renoncer à utiliser des informations génétiques comme critères d'éligibilité à une assurance-vie. Leur moratoire, qui expire l'année prochaine, prévoit cependant une exception notable. Ils ont la possibilité de prendre en compte une anomalie génétique dans leurs textes : celle responsable de la chorée de Huntington, plus connue sous le nom de maladie de Huntington. En France, la loi interdit la pratique de la discrimination génétique par les assureurs, mais avec le fort développement de la médecine prédictive, il n'est pas exclu que la situation évolue un jour… Or la maladie de Huntington se prête bien à cette forme de ségrégation, car même si elle reste longtemps asymptomatique, la présence de l'anomalie génétique chez quelqu'un permet de prédire une issue fatale avec beaucoup plus de certitude que s'il s'agissait d'un fumeur ou d'un motocycliste…

Un porteur du gène défectueux développera des troubles de l'humeur et de la mémoire parfois dès la fleur de l'âge, mais le plus souvent entre 30 et 50 ans. Ensuite, ses symptômes s'aggraveront et se diversifieront, prenant la forme de spasmes, de mouvements incontrôlables et d'une démarche hésitante évoquant une « danse » saccadée. Peu à peu, les fonctions corporelles ralentiront jusqu'à l'immobilité complète et la mort.

Depuis longtemps, les chercheurs ont compris que la maladie résulte d'une anomalie dans un gène, nommé *HD* en français (de l'anglais *Huntington disease*). Tous les humains portent le gène *HD*, lequel joue un rôle essentiel dans le développement prénatal du système nerveux. Mais ce gène varie d'une personne à l'autre et, selon la version que l'on porte, on développe la maladie ou non.

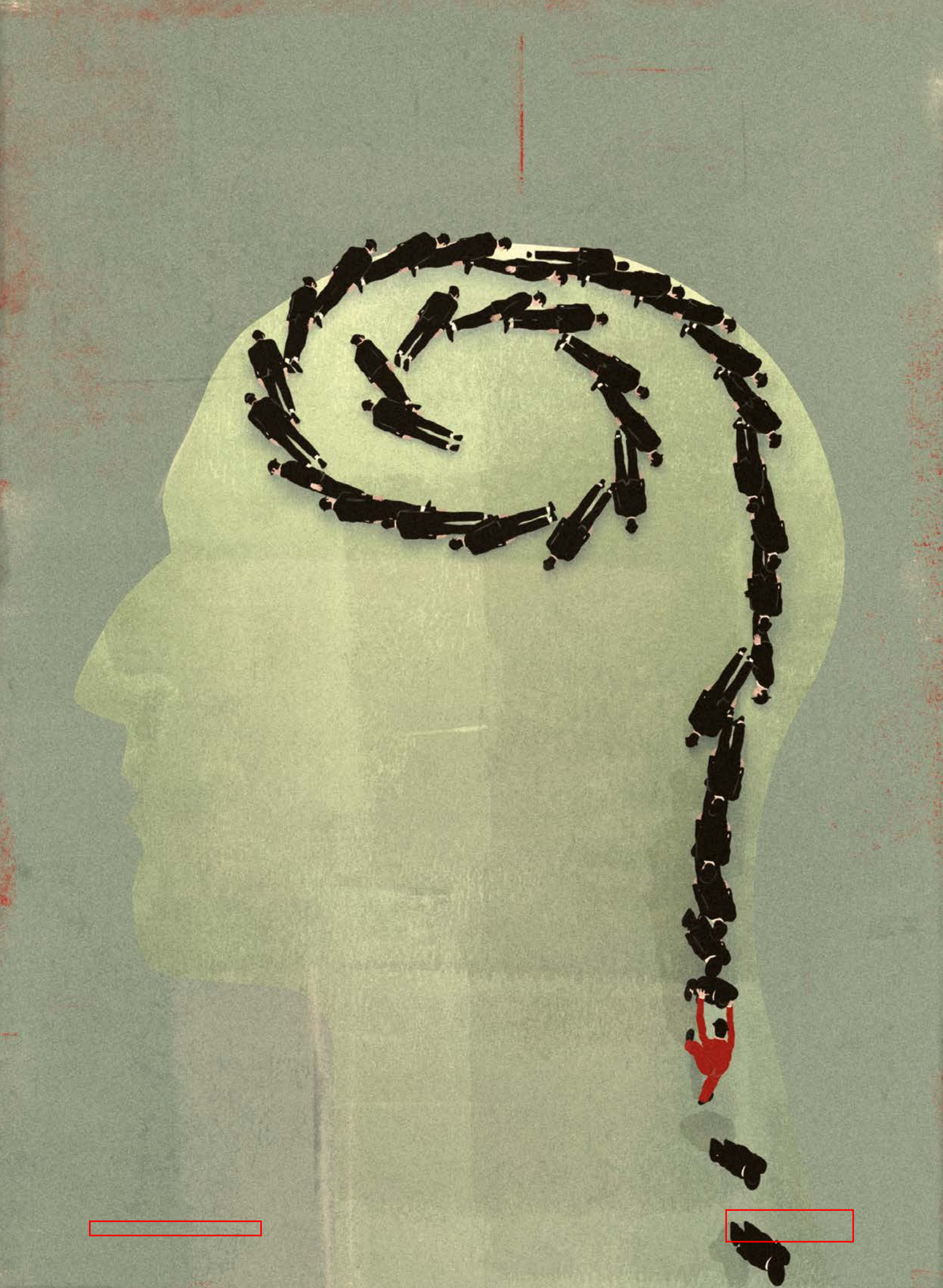
Au-delà de 35 répétitions dans le gène

Une portion du gène contient un motif constitué de trois nucléotides (les briques de l'ADN) – le triplet C-A-G – répété plusieurs fois. Chez les personnes saines, le triplet est répété entre 9 et 35 fois ; si les répétitions sont plus nombreuses, le sujet développera la maladie. Une seule copie défectueuse du gène sur les deux héritées des parents suffit à entraîner la maladie. Tout enfant d'un parent porteur d'un gène *HD* défectueux a donc une chance sur deux d'être porteur lui aussi. Environ 5 à 7 personnes sur 100 000 sont concernées par cette maladie héréditaire dans

L'ESSENTIEL

- La répétition excessive d'une séquence dans un certain gène déclenche la maladie de Huntington.
- On vient de reconstituer l'évolution de ce gène.
- La maladie serait un sous-produit indésirable d'un processus utile : une répétition de séquences favorisant le développement du système nerveux au fil de l'évolution.
- Dans les lignées affectées, l'ampleur de ces répétitions tend à augmenter d'une génération à la suivante.
- Cela finit par déclencher les symptômes de la maladie, notamment les mouvements incontrôlés qui la caractérisent.

© Andrea Usai



les pays occidentaux selon l'Organisation mondiale de la santé. En France, 18 000 personnes sont dans ce cas, dont environ 6 000 ont déjà les symptômes.

Les chercheurs savent aussi que les symptômes de la maladie de Huntington découlent de la mort de neurones dans le cortex et dans le striatum – des régions du cerveau qui contrôlent les mouvements du corps et les fonctions cognitives supérieures. En conséquence, la plupart des recherches entreprises sur la maladie visent à comprendre comment elle détruit les neurones et à développer des moyens thérapeutiques pour contrecarrer ce processus.

Le gène existe aussi chez l'amibe

Comme nombre d'autres, notre laboratoire consacre beaucoup d'énergie à de telles recherches. Il y a quelques années, elles ont amené plusieurs d'entre nous à s'interroger sur la persistance des versions pathologiques du gène *HD* au fil des générations. Pourquoi n'ont-elles pas été éliminées par la sélection naturelle ? La toxicité du gène *HD* étant associée à une répétition excessive du triplet C-A-G, cette répétition conférerait-elle un avantage évolutif tant qu'elle n'est pas excessive ? Les personnes atteintes de la maladie savent bien que la réponse à cette question ne les guérira pas, mais elles veulent aussi en savoir plus.

Récemment, les recherches sur cette énigme ont fourni des informations étonnantes sur le rôle du gène *HD* dans le développement du système nerveux des humains et d'autres organismes : la répétition du triplet C-A-G favorise le développement de certaines fonctions neurologiques, du moins dans la limite du seuil de déclenchement de la maladie. En ce sens, la maladie de Huntington ne serait pas tant un défaut génétique qu'un sous-produit indésirable d'un processus favorisant le développement du cerveau au fil de l'évolution. Une modification génétique qui améliorerait nos fonctions cognitives, mais qui aurait des conséquences tragiques lorsqu'elle prend trop d'ampleur : tel est le paradoxe de la maladie de Huntington.

Pour parvenir à cette conclusion, les chercheurs ont dû remonter aux ancêtres communs des humains et d'amibes nommées *Dictyostelium discoideum*. Les amibes sont des organismes unicellulaires eucaryotes (des cellules à noyaux) dont le registre

L'évolution du système nerveux en accéléré

De récentes expériences ont révélé que la répétition de triplets C-A-G dans le gène *HD* influence la manière dont le système nerveux évolue chez les vertébrés : un plus grand nombre de triplets permet un développement plus élaboré.

Nos recherches ont porté sur les effets de ce gène sur les rosettes neurales, des structures qui se forment dans les cultures de cellules embryonnaires. Nous avons étudié la formation de rosettes en utilisant des cellules souches prélevées chez de jeunes embryons de souris, donc des cellules ayant la capacité de se différencier en d'autres types cellulaires. Traitées avec des molécules connues pour orchestrer le développement du système nerveux, de telles cellules se muent en cellules neuroépithéliales formant un motif de fleur autour d'une cavité centrale : une rosette neurale. Ces structures imitent le développement du tube neural chez l'embryon – la structure qui donnera le système nerveux.

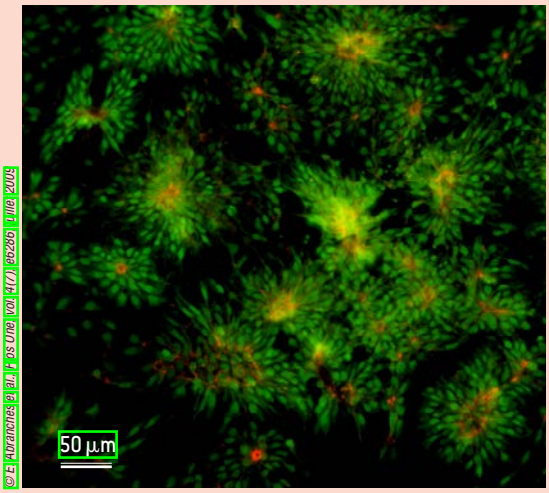
Nous avons d'abord montré que le gène *HD* joue un rôle important dans la formation des rosettes : il permet aux cellules qui les constituent d'adhérer les unes aux autres. De fait, des cellules souches privées d'un gène *HD* sain ne forment pas de rosettes : en l'absence du gène sain, une enzyme coupe la protéine responsable de l'adhésion à la surface des cellules, ce qui les empêche de se lier. Lorsque le gène est restauré, des rosettes commencent à se former.

Nous nous sommes ensuite demandé ce qui arriverait si nous supprimions le gène original de la cellule souche de souris et le remplacions par un gène *HD* d'amibe (sans triplet C-A-G), d'amphioxus (avec deux triplets), de poisson (quatre triplets) et d'humain (quinze triplets). Les différences qui apparaissent alors dans le développement des rosettes suggèrent que, d'une espèce à l'autre, plus le nombre de répétitions est important, plus le gène *HD* est apte à contribuer à la formation du système nerveux.

Les gènes *HD* des espèces les moins complexes, telle l'amibe, ne produisent pas de rosettes. La première structure reconnaissable, bien qu'incomplète, correspond à l'insertion d'un gène *HD* d'amphioxus. En général, les gènes contenant plus de triplets C-A-G donnaient des rosettes mieux formées, plus grandes et dotées d'une plus grande cavité centrale (l'équivalent de l'intérieur du tube neural). Le gène *HD* de poisson induit la formation de belles rosettes (des structures plus grandes, composées de cellules beaucoup plus nombreuses que celles produites avec le gène de l'amphioxus). Le gène humain, qui a le plus grand nombre de triplets, a produit les meilleurs résultats.

Ces rosettes de plus en plus structurées d'une espèce à l'autre résument en quelque sorte les transformations que le système nerveux a pu subir au cours de milliards d'années d'évolution.

— C. Z. et E. C.



© Le Hübanches et al. / Pas Une / KOI / 4(7) e0266 / juillet 2009

LES ROSETTES neurales sont des structures en forme de fleur qui apparaissent quand des cellules souches embryonnaires se différencient en cellules du système nerveux. Elles servent de modèle pour étudier le développement du système nerveux, et ont permis aux auteures d'étudier l'impact du gène *HD* sur ce développement chez différentes espèces.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

fossile atteste l'existence il y a 750 millions d'années au moins. Les formes primitives de vie dont descendent à la fois les humains et les amibes ont vécu entre le Paléoprotérozoïque et le Mésoprotérozoïque, il y a plus d'un milliard d'années, et ont été les premiers organismes à porter un gène *HD*, même s'il était un peu différent du gène humain.

Aujourd'hui, des amibes *D. discoideum* vivent dans la terre et les feuilles mortes du sol forestier, où elles se nourrissent de bactéries. En 2009, les données génétiques engrangées ont permis à l'équipe de Miguel Andrade-Navarro, du centre Max-Delbrück de médecine moléculaire, à Berlin, de mettre en évidence l'existence d'un gène *HD* chez ces amibes. Les chercheurs ont constaté qu'une différence entre ce gène et le gène humain est qu'il ne comporte pas de triplet C-A-G. Pour autant, il s'est révélé jouer un rôle déterminant dans une étape clé de la vie de *D. discoideum* : il permet aux amibes individuelles de se joindre à d'autres pour former une entité pluricellulaire nommée pseudoplasmodium.

En 2011, Michael Myre et James Gusella, de l'hôpital général du Massachusetts, aux États-Unis, ont montré que le gène régule plusieurs processus cellulaires vitaux de ces amibes, dont le passage au stade pluricellulaire. Privées du gène *HD*, des cellules isolées se déplacent difficilement et sont incapables de s'agréger à d'autres. Une fois constituée, cette société d'amibes résiste mieux à une pénurie alimentaire ou à un environnement difficile qu'un individu isolé.

Plus le système nerveux de l'animal est élaboré, plus les répétitions dans le gène sont nombreuses

À la recherche des premières répétitions

En fait, le gène *HD* remplit de nombreuses fonctions dans la vie des amibes. Une équipe de l'université Johns Hopkins, à Baltimore, aux États-Unis, a montré que ce gène contrôle à quel moment ces organismes se reproduisent et qu'il régule leur réponse aux stimuli environnementaux les incitant à se rapprocher de ressources alimentaires. Et, dans notre laboratoire, nous avons mis en évidence que la version de *Dictyostelium* du gène *HD* protège des cellules mammifères contre des stimuli qui déclenchent la mort cellulaire.

L'apparition des amibes a précédé de loin la séparation, il y a plus de 540 millions d'années, des eumétazoaires (c'est-à-dire tous les animaux sauf les éponges et autres placozoaires) en deux branches : les protostomiens, qui comprennent les arthropodes (insectes, crustacés, tardigrades…) et les mollusques ; et les deutérostomiens, qui ont donné les premiers vertébrés – les poissons, oiseaux, amphibiens, reptiles, mammifères, primates et les humains modernes. Seuls les deutérostomiens présentent des répétitions du triplet C-A-G dans la région du gène où se trouve la mutation à l'origine de la maladie de Huntington humaine (*voir la figure pages suivantes*).

En 2008, nous avons montré que le gène *HD* a commencé à acquérir des triplets C-A-G dans une branche ancienne de deutérostomiens, les échinodermes (l'oursin *Strongylocentrotus purpuratus*, par exemple). En collaboration avec des bio-informaticiens de l'université de Milan, nous avons déchiffré la séquence d'ADN du gène *HD* de l'oursin et identifié deux triplets C-A-G dans la partie initiale du gène.

La séquence d'ADN de cet organisme est cependant différente de la séquence humaine. Même si les oursins ont un système nerveux primitif, le gène est surtout exprimé au sein de tissus non neuronaux. Son absence du système nerveux suggère qu'au départ, le gène *HD* et ses deux triplets C-A-G n'ont pas joué de rôle important dans le système nerveux. La recherche sur les triplets C-A-G chez des protostomiens n'en est encore qu'aux premiers stades, mais il est clair qu'ils étaient rares (les abeilles ne présentent par exemple qu'un seul triplet C-A-G). Dans la plupart des cas, les gènes de ces lignées animales ne comportent qu'un seul triplet C-A-G.

À la fin des années 2000, notre laboratoire a séquencé les gènes *HD* d'autres deutérostomiens. La séquence la plus surprenante fut celle de l'amphioxus, un organisme de la famille des Céphalochordés, que nous avons étudié avec l'équipe de Mario Pestarinos, de l'université de Gênes. La biologie de ce petit animal marin ressemblant à un poisson

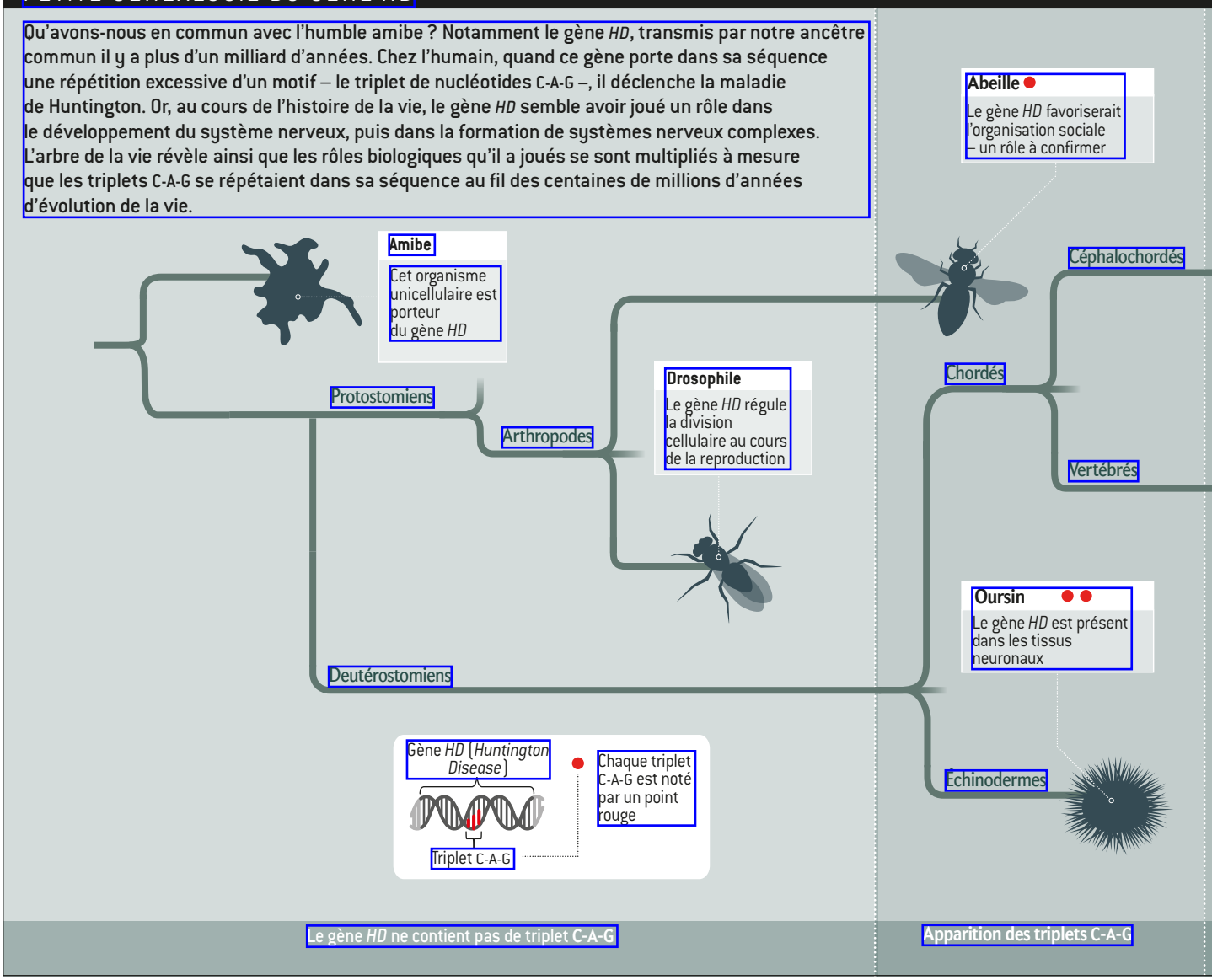
LES AUTEURES

Chiara ZUCCATO et Elena CATTANEO sont professeures de pharmacologie au département de biosciences de l'université de Milan, en Italie.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

PETITE GÉNÉALOGIE DU GÈNE *HD*

Qu'avons-nous en commun avec l'humble amibe ? Notamment le gène *HD*, transmis par notre ancêtre commun il y a plus d'un milliard d'années. Chez l'humain, quand ce gène porte dans sa séquence une répétition excessive d'un motif – le triplet de nucléotides C-A-G –, il déclenche la maladie de Huntington. Or, au cours de l'histoire de la vie, le gène *HD* semble avoir joué un rôle dans le développement du système nerveux, puis dans la formation de systèmes nerveux complexes. L'arbre de la vie révèle ainsi que les rôles biologiques qu'il a joués se sont multipliés à mesure que les triplets C-A-G se répétaient dans sa séquence au fil des centaines de millions d'années d'évolution de la vie.



marque un tournant dans l'évolution du développement du système nerveux : une structure neurale polarisée s'étend de l'avant à l'arrière de l'animal. L'avant de cette structure s'est différencié en une sorte de petit sac, que l'on interprète comme un précurseur du cerveau.

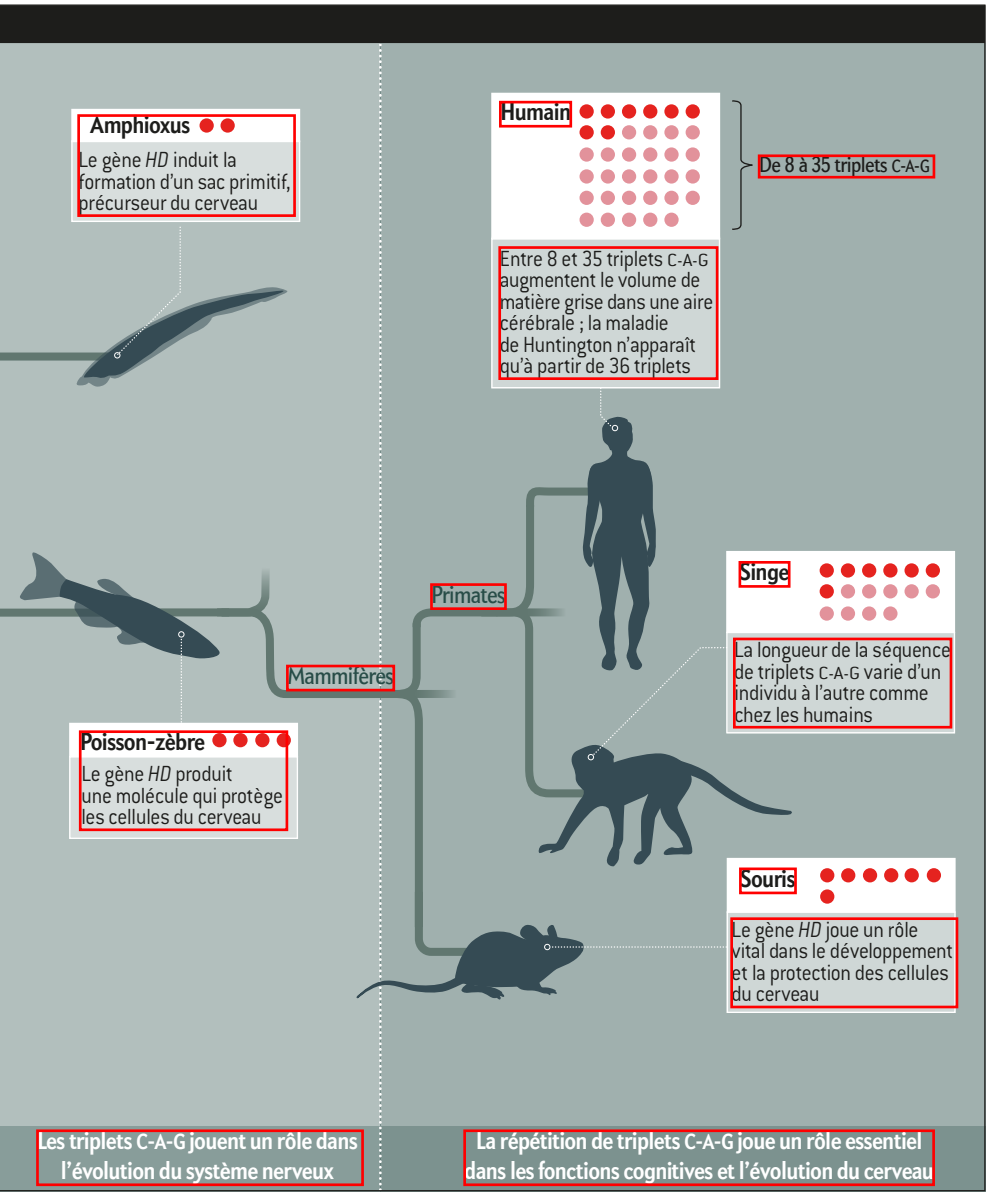
Comme chez les oursins, la séquence du gène *HD* de l'amphioxus porte deux triplets C-A-G voisins. Mais cette fois, la séquence de nucléotides qui encadre la paire est similaire à celle des vertébrés, y compris l'homme ; en outre, la protéine codée par ce gène se trouve essentiellement dans le tissu neuronal, suggérant que cette différence a contribué à la formation du cerveau primitif.

Les chercheurs ont alors étudié les génomes de vertébrés. Ils se sont ainsi aperçus que plus le système nerveux de l'animal était élaboré, plus les répétitions de triplets C-A-G étaient nombreuses – le nombre maximal étant atteint chez les humains. Ce constat est le fruit de l'examen d'espèces plus ou moins proches de l'humain, telles que les bovins (15 triplets), les cochons (12), les chiens (10), les souris (7) et les opossums (6). Le nombre de triplets varie aussi d'un individu à l'autre au sein de diverses espèces, notamment les primates.

L'apparition des vertébrés marque le début d'un nouveau chapitre de l'évolution du système nerveux. Leur cerveau se développe à partir d'une structure creuse, le tube neural, qui se forme chez l'embryon puis se développe en cerveau. En 1997, l'équipe de Marcy MacDonald, de l'hôpital général du Massachusetts, a découvert que le gène *HD* intervient dans la formation du tube neural. Une avancée que notre équipe a confirmée et étendue en 2012 en montrant que le gène contribue *in vitro* au développement d'une structure ressemblant à un tube neural.

Entre-temps, d'autres lignes de recherche ont révélé un autre rôle de la répétition des triplets C-A-G : améliorer la cognition ! Ces découvertes découlent en partie des efforts lancés dans les années 1970 pour identifier le gène responsable de la maladie de Huntington. En 1993, la

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



© Graphic by Amanda Montañez

généticienne Nancy Wexler et les 57 autres chercheurs d'une collaboration internationale, le Groupe de recherche collaborative sur la maladie de Huntington, ont isolé le gène *HD* humain sur le chromosome 4 et l'ont séquencé. Le groupe a ainsi ouvert la voie à la découverte du seuil fatidique de 36 répétitions de triplets C-A-G à partir duquel la maladie se déclenche.

Un an après, David Rubinsztein, un généticien de l'université de Cambridge, a publié un travail suggérant que, chez les personnes saines, la région du gène portant la répétition des triplets tend à s'allonger lors la transmission aux descendants. Et la même année, le Prix Nobel Max Perutz, de l'université de Cambridge, a montré que la glutamine, l'acide aminé codé par le triplet C-A-G, favorise les liaisons avec d'autres protéines. Après ces découvertes, cependant, les recherches sur la fonction des répétitions non pathologiques de triplets se sont arrêtées. À l'époque, ces motifs et d'autres séquences étaient vus comme de l'« ADN poubelle », *a priori* sans fonction.

Mais en 2008, John Fondon, qui travaille désormais à l'université du Texas, à Arlington, ainsi que David King, de l'université du Sud de l'Illinois, à Carbondale, ont relancé l'idée que le triplet interviendrait dans le développement et l'évolution du système nerveux, et que sa répétition dans le cerveau y améliorerait la cognition et les aptitudes aux relations sexuelles et à d'autres interactions sociales.

Plus de triplets, plus de matière grise

Des preuves expérimentales obtenues depuis appuient ces hypothèses : ainsi, selon une étude menée en Colombie Britannique, 1 individu sur 17 porte une copie « intermédiaire », c'est-à-dire une version du gène *HD* contenant entre 27 et 35 répétitions du triplet – un nombre élevé sans être pathologique. Une telle personne aura tendance à avoir plus de neurones dans le pallidum dorsal, une région du cerveau qui gouverne la planification et le contrôle des mouvements et intervient dans des processus cognitifs supérieurs. En étudiant des neurones en culture, notre laboratoire a aussi montré qu'un nombre élevé de triplets conduit à des pseudo-systèmes nerveux plus élaborés *(voir l'encadré page 66)*.

En fait, les porteurs asymptomatiques du gène *HD* défectueux présentent aussi un fonctionnement cognitif de haut niveau. En 2012, Carsten Saft et Christian Beste, de l'université de la Ruhr, à Bochum, en Allemagne, ont constaté que de telles personnes avaient, dans certains tests visuels ou sensoriels, de meilleures performances que des sujets non porteurs.

Des recherches ont aussi exploré les fonctions spécifiques du gène *HD* dans le cerveau. Toujours avec des neurones en culture, nous avons découvert que le gène non défectueux rend les neurones plus robustes et plus résistants au stress. Inversement, d'autres biologistes ont montré que l'inactivation du gène dans le cerveau de souris induit la mort des cellules et

Huntington, maladie du cerveau en développement

De plus en plus de données suggèrent qu'un développement anormal du cerveau contribue à la maladie de Huntington.

C'est en général à l'âge adulte que la maladie de Huntington se manifeste par une combinaison de symptômes psychiatriques, cognitifs et moteurs. Sur le plan tissulaire (histopathologique), elle se caractérise par la dégénérescence de neurones du cerveau, en particulier ceux du striatum et du cortex. Cette couche cérébrale, la plus externe du cerveau, joue un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions sensorielles, motrices et cognitives... Le fait que la maladie apparaisse la plupart du temps entre 30 et 50 ans et que l'on observe une mort importante des neurones adultes explique que, dans leur lutte pour comprendre la maladie de Huntington, les chercheurs se soient concentrés sur les neurones adultes et les fonctions toxiques qu'y exerce la protéine mutée impliquée dans la maladie, la huntingtine. Cependant, cette protéine est produite dès le développement embryonnaire et y joue un rôle essentiel. La preuve la plus marquante de ce fait majeur est très vite apparue après la découverte du gène codant la huntingtine – le gène *HD* –, lorsque plusieurs laboratoires ont montré qu'en son absence, les souris meurent *in utero*. Depuis, plusieurs études ont confirmé l'importance de cette protéine pendant le développement des différentes régions cérébrales. C'est pourquoi notre équipe s'est penchée sur le rôle précis de la huntingtine pendant le développement cortical. En effet, dans la maladie de Huntington, les connexions entre neurones au sein du cortex et du cortex vers le striatum sont déficientes précocement. En outre, les neurones corticaux dégénèrent à l'âge adulte... Comment se développe le cortex ? Au début, il est constitué d'une seule couche de cellules qui se multiplient, amplifiant la réserve de cellules progénitrices (aptes à en engendrer d'autres). Ces dernières produisent ensuite des neurones qui migrent de la partie interne vers la partie externe du cortex, selon un processus finement régulé qui aboutit à l'assemblage des six couches de neurones formant le cortex mature. Notre équipe a montré que la huntingtine joue un rôle important dans le maintien de la réserve de progéniteurs corticaux, car elle régule leur division cellulaire. Elle est aussi nécessaire à la migration des neurones nouvellement engendrés. Lorsque la huntingtine contient la mutation responsable de la maladie de Huntington, ces mécanismes – division cellulaire des progéniteurs puis migration des nouveaux neurones – sont altérés. Ainsi, dans les modèles murins (sur souris) de la maladie de Huntington, on constate non seulement que le nombre de cellules progénitrices diminue, mais aussi que leur migration est perturbée : elles ne migrent pas toutes correctement jusqu'à la couche corticale qu'elles atteignent habituellement. Nous avons aussi établi que ces défauts du développement cortical persistent à l'âge adulte et modifient la morphologie neuronale.

Ainsi, malgré le fait que la maladie de Huntington se manifeste tardivement, elle affecte le développement même du cerveau. Une autre équipe a montré de son côté que si l'on restreint chez la souris l'expression de la huntingtine mutante à la période embryonnaire, alors certaines signatures de la maladie apparaissent chez l'adulte. Et chez les humains ? Les constatations faites chez la souris invitent à penser que des défauts dans le développement du cerveau sont à la base de certaines manifestations cliniques. On peut aussi imaginer que des compensations se mettent en place pour contrecarrer ces anomalies développementales. L'étude de ces aspects permettra d'avancer notre connaissance de cette pathologie, connaissance indispensable pour en trouver le remède.

– Sandrine Humbert
Inserm, Grenoble institut des neurosciences (GIN), Grenoble

l'apparition de symptômes neurologiques similaires à ceux observés chez des souris porteuses du gène défectueux. Nous avons aussi montré que le gène *HD* stimule la production d'une protéine – le facteur neurotrophique dérivé du cerveau – qui favorise la formation des circuits cérébraux et la transmission des signaux nerveux.

Plus important peut-être, c'est durant les premiers stades du développement embryonnaire que le gène *HD* est le plus actif. Sans lui, nous ne serions tout simplement pas nés ! Il joue un rôle dès la gastrulation, c'est-à-dire le stade du développement embryonnaire à partir duquel se développent les principaux tissus du corps. Par la suite, il régule la formation de nouveaux neurones et les aide à s'interconnecter.

En dépit des progrès accomplis, le paradoxe de Huntington persiste. Le gène *HD* a sans doute contribué de façon cruciale à notre évolution le jour où il a acquis son motif répété extensible. Toutefois, cette tendance à s'étendre a aussi apporté une maladie dévastatrice. Les énigmes liées à la répétition de segments dans le code génétique occuperont sans doute beaucoup les chercheurs au cours des années à venir. Nous devons mieux comprendre pourquoi la longueur du gène *HD* varie autant. Quelles modifications interviennent dans le cerveau quand le nombre de triplets C-A-G répétés dépasse son seuil fatal ? Pourquoi ce seuil est-il de 36 ? Le gène *HD* est à la fois un fléau et une bénédiction. Le comprendre soulagera quelque peu les malades, puisqu'ils sauront que leur injuste maladie n'est pas un défaut, mais plutôt l'exagération d'un des processus clés qui ont fait de nous ce que nous sommes. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. Lo Sardo *et al.*, **An evolutionary recent neuroepithelial cell adhesion function of huntingtin implicates ADAM10-Ncadherin**, *Nature Neuroscience*, vol. 15, pp. 713-721, 2012.

C. Zuccato *et al.*, **Molecular mechanisms and potential therapeutical targets in Huntington's disease**, *Physiological Reviews*, vol. 90(3), pp.905-981, 2010.

S. Humbert, **Maladie de Huntington : Pourquoi les neurones meurent-ils ?**, *Pour la Science* n° 383, septembre 2009.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

1 AN - 12 Nos
59€
24% d'économie

2 ANS - 24 Nos
110€
29% d'économie

3 ANS - 36 Nos
159€
32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS475B

❑ **OUI, je m'abonne à *Pour la Science* en formule Découverte :**

- ❑ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de ~~78,50€~~ **(D1A59E)**
- ❑ **2 ans • 24 numéros • 110 €** au lieu de ~~157 €~~ **(D2A110E)**
- ❑ **3 ans • 36 numéros • 159 €** au lieu de ~~235,50 €~~ **(D3A159E)**

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

❑ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule). _____ @ _____

Grâce à votre email nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/08/17 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*.

Dans les greniers des **lycées**

Fruit d'un périple de longue haleine dans les oubliettes des lycées, un beau livre présente près de 1 000 instruments ayant servi à enseigner la physique du XVIIIe siècle au milieu du XXe… Des trésors à remettre au goût du jour !

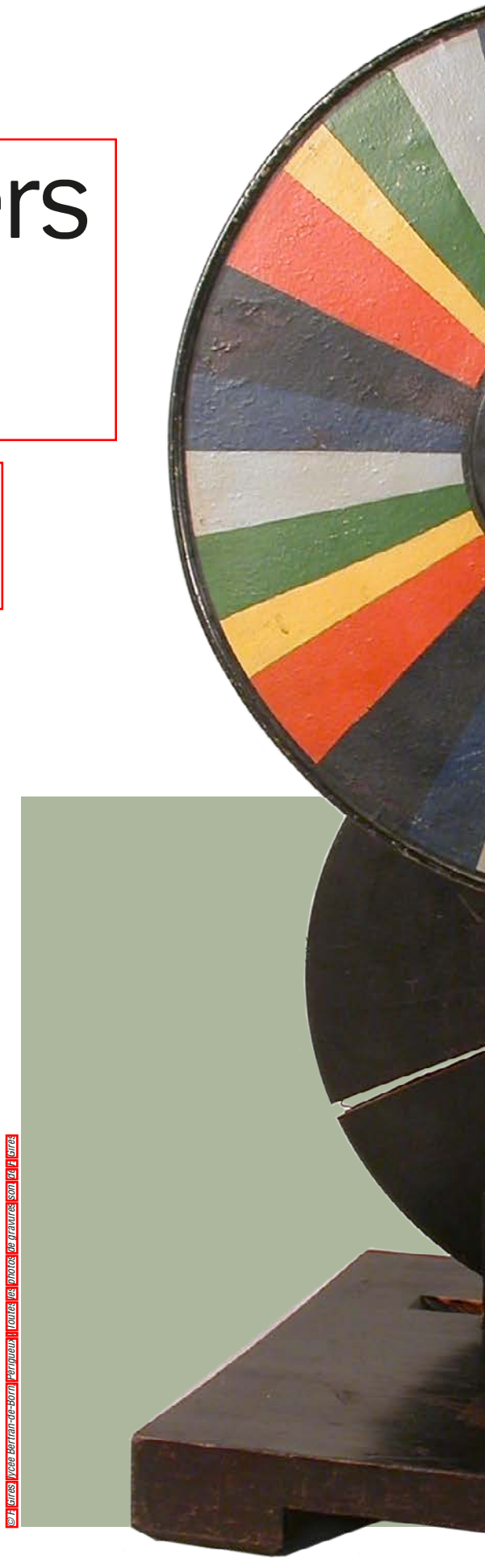
Francis Gires

Culbuteur de Hardy, passe-vin de Galilée, presse pour lentille de glace, graphomètre à pinnules, globe étincelant, œuf électrique, grand prisme de paraffine, morsophone, parafoudre à cornes, arrosoir magique, coupe-pommes, cloche de verre aux quatre perles… Partout en France, des collèges, lycées et universités recèlent des collections d'étranges objets. Depuis 2003, notre association a répertorié plus de 5 500 instruments, issus d'une soixantaine d'établissements, dont elle a réalisé autant de fiches sur son site où l'inventaire se poursuit. Ce patrimoine, aujourd'hui présenté dans une encyclopédie, témoigne d'un temps où l'enseignement de la physique partait de l'expérience.

La physique expérimentale est née au milieu du XVIIIe siècle sous l'influence de l'abbé Jean Antoine Nollet. En 1746, à Versailles, devant le roi Louis XV et sa cour, l'abbé fit une démonstration qui marqua les esprits : il donna une commotion électrique à une rangée de 180 gardes se tenant la main. Dès lors, tous les salons le réclamèrent et son cours de physique fit salle comble, tandis que les cabinets de physique se multipliaient dans les milieux nobles et bourgeois.

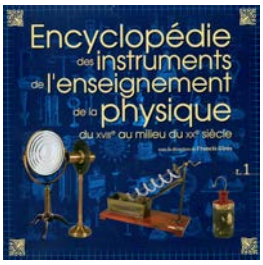
Le métier de constructeur d'instruments prit ainsi son essor et, en 1852, l'enseignement de la physique en classe, resté anecdotique devant celui des humanités classiques, s'affirma à son tour : le ministère de l'Instruction publique créa un cursus scientifique à part entière, recommandant de « partir de l'expérience fondamentale toutes les fois que le sujet le permet », et alloua des crédits importants à l'achat de matériel scientifique.

Ainsi débuta l'âge d'or de la construction instrumentale, qui dura un demi-siècle et constitua l'essentiel des cabinets de physique et d'histoire naturelle des lycées. Aujourd'hui, ces instruments sont plus que jamais utiles : aucun écran, aucun livre ne fixeront aussi bien les phénomènes physiques dans l'esprit des lycéens que leur perception directe. ■



© F. Gires, lycée Bertran-de-Born, Périgueux ; toutes les photos, de gravures sont de F. Gires

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



Trois tomes sous coffret, 1 350 pages, 100 euros, Aseiste, 2016

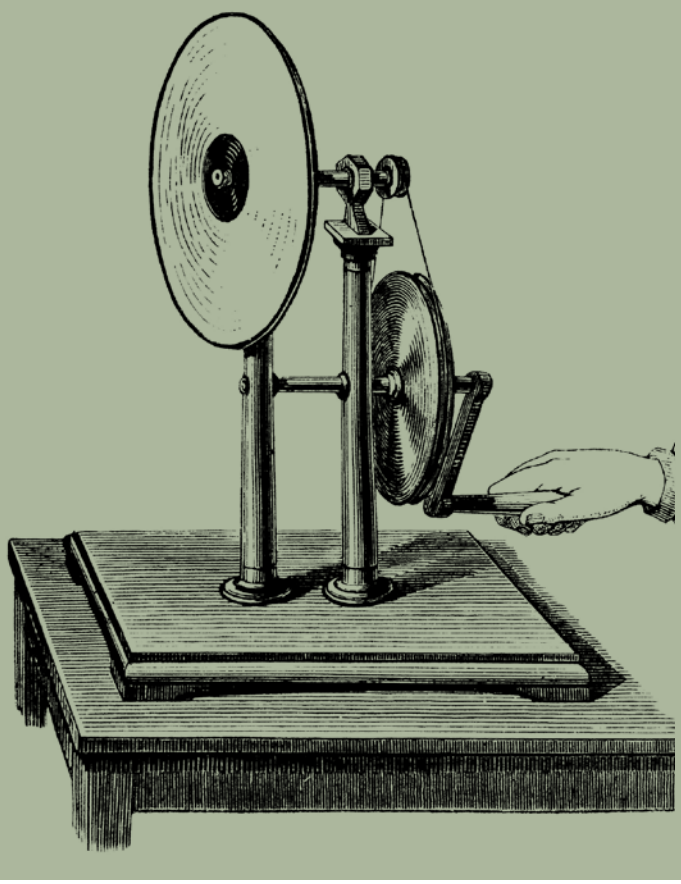
L'AUTEUR

Francis GIRES, président de l'Association de sauvegarde et d'étude des instruments scientifiques et techniques de l'enseignement (Aseiste), a dirigé la publication de l'*Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIIIe siècle au milieu du XXe siècle.*

Bon de commande disponible sur www.aseiste.org.

DISQUE DE NEWTON

Cet instrument inspiré de la théorie de Newton sur les couleurs montre que la superposition des rayonnements visibles du spectre solaire reconstitue la lumière blanche. Sur le disque sont peints des secteurs présentant les couleurs du spectre solaire dans l'ordre où elles se suivent et avec des surfaces ajustées. Fixé à un support muni de deux poulies reliées par une courroie sans fin, le disque est mis en rotation à l'aide d'une manivelle. Quand il tourne vite, les images des différents secteurs se forment successivement sur la rétine, mais, du fait de la persistance rétinienne, la lumière est perçue comme de la lumière blanche. Si les surfaces sont mal ajustées, le disque prend la couleur du secteur de trop grande superficie, en plus pâle.



HÉMISPHÈRES DE MAGDEBOURG

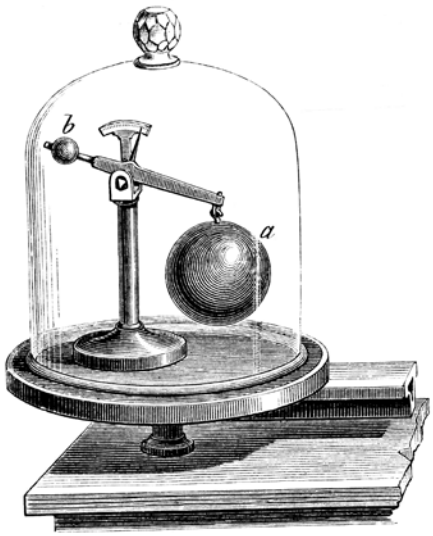
Ces deux hémisphères creux en laiton mettent en évidence le vide. Leurs bords, garnis d'une rondelle de cuir enduite de suif, forment un contact hermétique. L'hémisphère inférieur porte un robinet, l'autre un anneau qui sert de poignée. Initialement, les deux hémisphères ne sont pas solidaires. On visse l'hémisphère inférieur sur une pompe à vide et l'on pose le second sur le premier. La pompe mise en route, l'air se raréfie dans les hémisphères. On referme le robinet et l'on retire la pompe. Il est alors impossible de séparer les deux hémisphères : la pression atmosphérique extérieure les maintient soudés. Quand on ouvre le robinet, en revanche, l'air remplit les hémisphères, qui se séparent alors facilement : la pression s'est équilibrée de part et d'autre de la paroi. Le physicien allemand Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, présenta cette expérience en 1654 à l'empereur Ferdinand III : des attelages de quinze chevaux ne parvinrent pas à détacher deux hémisphères de 50 centimètres de diamètre. La nouvelle se répandit dans toute l'Europe !

© Marie-Solange Wachowiak | lycée Jacques-Amyot | Auxerre

© F. Gires | lycée Guez-de-Balzac | Angoulême

BAROSCOPE

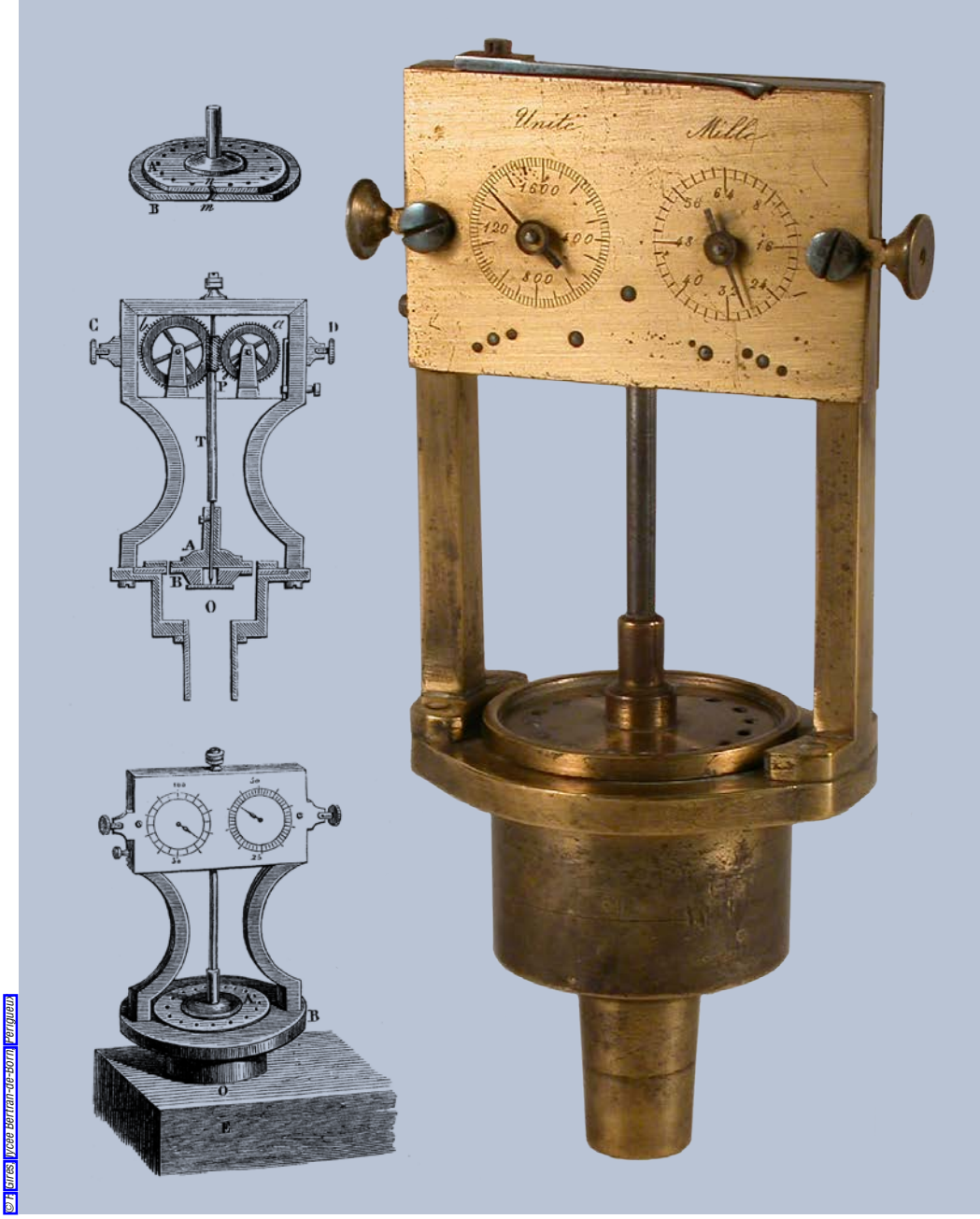
Tout corps plongé dans un gaz subit une poussée verticale vers le haut qui dépend du volume de gaz déplacé, selon le principe d'Archimède. C'est ce que prouve ce fléau de balance, portant à ses extrémités deux corps (*a* et *b*) de volumes très différents. Ayant équilibré le baroscope dans l'air, on le place sous la cloche d'une pompe à vide. Dès que l'air se raréfie, le fléau penche du côté du corps le plus volumineux (*a*), la poussée due à l'air qui le soutenait ayant disparu.



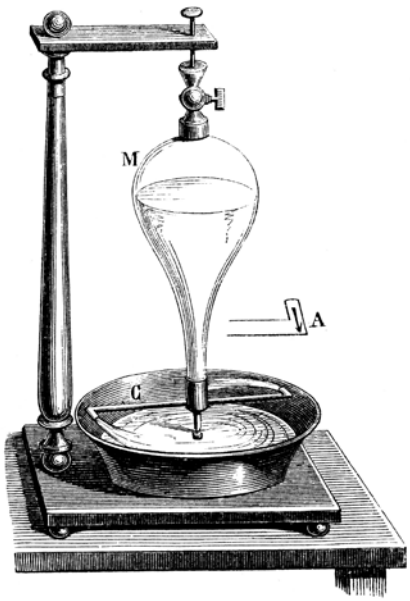
© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

SIRÈNE DE CAGNIARD-LATOUR

Le physicien français Charles Cagniard de Latour a inventé cet appareil en 1819 pour mesurer la fréquence d'un son. La sirène est constituée d'une boîte cylindrique O qui communique par sa base avec une soufflerie, d'un disque mobile A et d'un compte-tours (partie supérieure). Le couvercle B de la boîte est percé de dix-huit trous inclinés *(m)* et le disque mobile porte le même nombre de trous, inclinés en sens inverse *(n)*. Au centre, un axe T solidaire du disque entraîne des roues dentées (*a* et *b*) associées à des aiguilles qui affichent sur des cadrans le nombre de tours effectués par le disque. Quand de l'air est soufflé dans la boîte, le disque A tourne. Lorsque ses trous sont en face de ceux du couvercle B, de l'air les traverse et vibre. Un son est émis, dont on détermine la fréquence en multipliant le nombre de trous du disque par le nombre de tours qu'il effectue en une seconde. Pour trouver la fréquence d'un son émis par un instrument, on met la sirène à l'unisson avec l'instrument en agissant sur la soufflerie et l'on détermine sa fréquence. Il s'agit donc d'avoir une bonne oreille !



©T. Gires Lycée Bertran-de-Born Périgueux



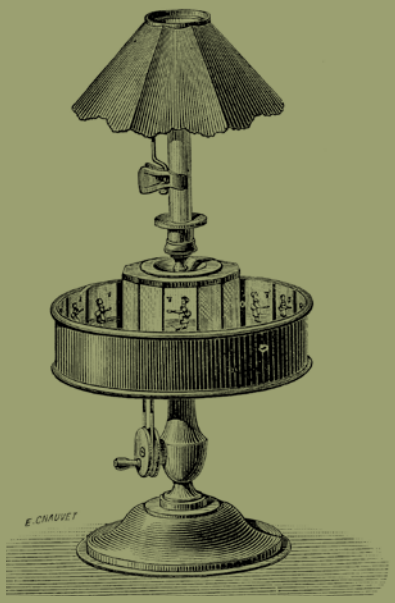
©T. Gires Lycée Guez-de-Balzac Angoulême

TOURNIQUET HYDRAULIQUE

Savez-vous comment fonctionnent les tourniquets d'arrosage ? Grâce aux forces pressantes que le liquide exerce sur les parois de l'appareil, comme dans l'instrument ci-contre – un vase M mobile autour d'un axe vertical, muni d'un petit orifice au sommet et, à sa base, de deux tubes C horizontaux et coudés. Quand on remplit le vase, l'appareil tourne tant que l'eau s'écoule : l'air qui entre lors de l'écoulement exerce une pression sur l'eau, laquelle presse aussi les parois du vase et des tubes. Des couples de forces apparaissent ainsi dans les tubes, qui tournent et entraînent le vase.

PRAXINOSCOPE DE REYNAUD

Emile Reynaud, enseignant-conférencier en sciences, inventa ce jouet optique en 1876. Constitué d'un prisme de douze miroirs faisant face à une bande de douze dessins montrant les différentes étapes d'une action, il donne l'illusion que celle-ci est continue lorsque l'on fait tourner la bande à l'aide d'une manivelle : les images se succèdent si vite que les spectateurs qui les observent défiler sur le prisme de glaces voient un mouvement continu à cause de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine. Un bougeoir entouré d'un abat-jour permet d'opérer même de nuit.

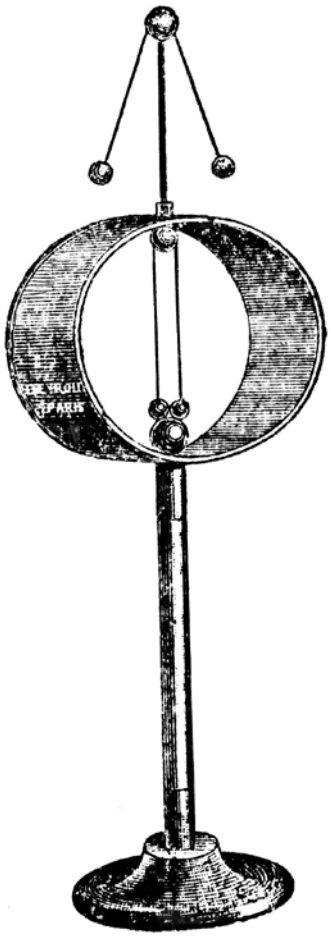


© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

© T. Sinsi / Vera Cruz-de-Berza / Antoniem

CYLINDRE OUVERT DE MASCART

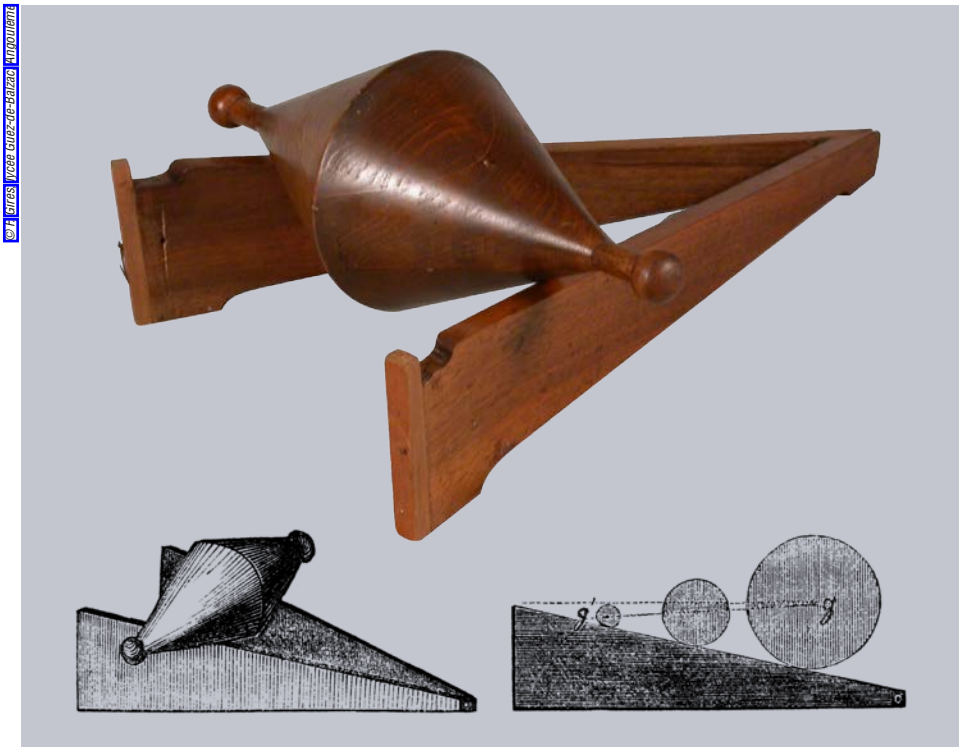
Lors d'un orage, l'électricité atmosphérique reste à la surface des carrosseries métalliques des automobiles ou des avions, et les passagers sont protégés. C'est le même phénomène que met en évidence le dispositif imaginé par Éleuthère Mascart, professeur de physique au Collège de France, dans la seconde moitié du XIXe siècle. Un cylindre creux conducteur en laiton est isolé sur un pied de bois. Dans son prolongement, une tige métallique, fixée sur le cylindre, porte deux pendules électriques (des billes en moelle de sureau suspendues à des fils de lin). Dans le cylindre, deux autres pendules sont en contact avec sa surface intérieure. Quand on électrise le cylindre, les pendules extérieurs divergent aussitôt, tandis que ceux à l'intérieur restent immobiles. On en conclut que seule la surface extérieure est chargée. Les charges électriques sur cette surface n'exercent aucune influence sur tout point à l'intérieur du conducteur, qui forme un écran électrique pour tout ce qu'il contient.



DOUBLE CÔNE DE NOLLET

« Il est beaucoup plus aisé de trouver de l'argent qu'un homme comme lui », disait Voltaire de l'abbé Jean Antoine Nollet, l'un des plus grands vulgarisateurs scientifiques européens du XVIIIe siècle. La démonstration du bicône est une des nombreuses expériences de physique décrites pour la première fois en France dans ses ouvrages. Elle illustre le fait que la stabilité d'un corps correspond à la position la plus basse de son centre de gravité, même si le mouvement qui conduit à cette position contredit l'intuition. L'objet comporte un double cône et deux planchettes identiques formant un angle aigu entre elles. Les bords supérieurs des planchettes constituent une sorte de plan incliné. On pose le bicône sur la partie inférieure du plan incliné. Il « remonte » alors le plan en tournant, suivant ainsi un mouvement en apparence contraire à celui des corps pesants. Mais en mesurant l'altitude du centre de gravité *g* du bicône au cours de son mouvement, on constate qu'elle décroît. En d'autres termes, le centre de gravité descend bien quand le bicône remonte la pente, et la loi du mouvement des corps pesants est donc validée…

© T. Sinsi / Vera Cruz-de-Berza / Antoniem



LOGIQUE & CALCUL

Quand considère-t-on qu'un théorème est définitivement prouvé ?

Renforcer la confiance qu'on a dans la démonstration d'un théorème difficile est possible. Il faudrait le faire pour le grand théorème de Fermat.

Jean-Paul DELAHAYE

Le « dernier théorème de Fermat » (ou « grand théorème de Fermat », ou « théorème de Fermat-Wiles ») affirme que si n est un entier supérieur à 2, alors il n'existe pas de triplets d'entiers positifs x, y, z tels que $x^n + y^n = z^n$. Il est considéré comme démontré depuis 1995. Andrew Wiles a d'ailleurs obtenu le prix Abel en 2016 pour sa contribution déterminante à la preuve de ce théorème.

Peu de gens comprennent le détail de la démonstration, dont la partie finale a été publiée par Andrew Wiles dans la prestigieuse revue *Annals of Mathematics*. Les experts compétents sont cependant tous d'accord pour dire qu'il n'y a aucune faille dans le raisonnement exposé. Depuis, plusieurs livres ont présenté aussi complètement que possible la démonstration. On peut avoir confiance : la preuve d'un théorème aussi célèbre est examinée en détail par une armée de mathématiciens intransigeants. La probabilité qu'il reste une erreur est infime.

Formaliser pour une meilleure garantie

Pourtant, les logiciens considèrent qu'on peut perfectionner la preuve et rendre le résultat plus sûr. Pourquoi ? Pour plus de certitude, il faudrait disposer d'une version formelle complète de la preuve, ou, ce qui revient au même, d'une version écrite de la preuve vérifiable par ordinateur. Les très longues preuves sont difficiles à formaliser, car chaque pas d'un raisonnement formel, aussi infime ou évident soit-il, doit y être détaillé et se conformer à des règles fixées une fois pour toutes. Pas question dans une preuve formelle d'écrire « Le cas $n = 5$ se traite comme le cas $n = 3$ », ou les traditionnels « On vérifie aisément que… », « Laissé en exercice au lecteur » ou « Trivial ».

Les outils informatiques d'écriture des démonstrations formelles, nommés « assistants de preuve », permettent de construire progressivement et minutieusement ces preuves ultimes, et réduisent donc le risque d'erreur bien plus encore que les vérifications humaines. Mentionnons quelques théorèmes que l'on a ainsi réussi à formaliser.

– Le théorème des quatre carrés de Lagrange : tout entier positif s'écrit comme la somme de quatre carrés (par exemple, $23 = 9 + 9 + 4 + 1$).

– Le théorème fondamental de l'algèbre : un polynôme de degré n à coefficients complexes a exactement n racines (en comptant les multiplicités de celles-ci).

– Transcendance du nombre $e = \exp(1) = 2{,}718\,281\,828\,459\ldots$: e n'est la racine d'aucun polynôme à coefficients entiers.

– Le premier théorème d'incomplétude de Gödel : tout système formel non contradictoire pour l'arithmétique ou une théorie plus puissante permet d'exprimer des énoncés E qu'il ne peut pas démontrer, et dont il ne peut pas démontrer la négation, non(E).

– Le théorème des nombres premiers de Hadamard et de La Vallée Poussin : la densité des nombres premiers autour de l'entier n est approximativement $1/\ln(n)$.

Notons aussi que les cas particuliers du théorème de Fermat-Wiles pour $n = 3$ et $n = 4$ ont été vérifiés par la méthode des assistants de preuve.

Reste que certaines preuves humaines sont trop complexes encore pour qu'on ait su les transformer en preuves informatiques. C'est le cas pour le grand théorème de Fermat. Il y a une raison profonde à cette difficulté de formalisation, qui est un sujet de préoccupation pour les logiciens lié à la façon dont un résultat mathématique prend du sens. Le programme de travail supplémentaire qu'ils mènent sur la preuve d'Andrew Wiles est une tentative utile de limiter les hypothèses implicites sur lesquelles la preuve aujourd'hui admise s'appuie, en même temps d'ailleurs qu'une approche pour aboutir à l'écriture d'une preuve formelle.

Notons que les assistants de preuve, qu'il ne faut pas confondre avec les outils de démonstration automatique (qui, eux, cherchent les démonstrations) ne font qu'aider le mathématicien : celui-ci reste aux commandes et propose les éléments organisant les démonstrations. Selon Wim Hesselink, spécialiste néerlandais du sujet, « Ces outils ne sont presque jamais capables de prouver seuls un théorème. Ils vérifient la validité des arguments que les humains leur présentent. »

Pour comprendre pourquoi travailler à améliorer et à reformuler la preuve

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Le dernier théorème de Fermat

L'énoncé de ce théorème est simple : « Si n est un entier supérieur à 2, il n'existe pas d'entiers positifs (non nuls) x, y, z tels que $x^n + y^n = z^n$. Pour $n = 2$, il existe une infinité de tels triplets, par exemple (3, 4, 5) puisque $3^2 + 4^2 = 5^2$. On pense que Fermat disposait de la démonstration pour $n = 4$.

Le cas $n = 3$ a été démontré par Leonhard Euler vers 1760. Le cas $n = 5$ a été prouvé par Adrien-Marie Legendre et Johann Dirichlet en 1825. Le théorème a été démontré jusqu'à $n = 36$ par Ernst Kummer en 1847. En 1976, Samuel Wagstaff publia une preuve du théorème de Fermat pour tous les entiers compris entre 3 et 1 million.

L'énoncé a été formulé par Pierre de Fermat dans une note écrite dans la marge d'un livre de Diophante, dont l'exemplaire est aujourd'hui perdu.

Plus de trois siècles ont été nécessaires pour qu'une preuve publiée soit reconnue correcte. Elle est due, pour la partie finale, au mathématicien britannique Andrew Wiles qui en présenta une première version en 1993, et en compléta certaines insuffisances en 1994 avec l'aide de Richard Taylor. Le fait que Fermat ait écrit qu'il disposait d'une jolie preuve du théorème est aujourd'hui considéré comme très probablement dû à une erreur de sa part. C'est principalement par les idées et outils mis en œuvre pour démontrer le résultat qu'il est considéré comme mathématiquement très important.

La preuve repose, entre autres, sur des méthodes et résultats d'Alexandre Grothendieck et Pierre Deligne. Elle est en définitive fondée sur des systèmes logiques puissants mettant en œuvre des objets mathématiques infinis allant bien au-delà des entiers.

Les logiciens s'interrogent aujourd'hui sur l'utilisation de ces objets à la fois très abstraits et logiquement plus risqués que les entiers. Ils tentent de formuler des preuves du théorème de Fermat qui n'utilisent que les entiers (donc jamais explicitement d'objets infinis).

Ils essaient même de se limiter à des raisonnements simples sur ces entiers tels qu'ils sont définis par le système formel EFA *(voir page 83)*. Obtenir une preuve du théorème de Fermat vérifiable par ordinateur semble aujourd'hui encore hors de portée.

© Domaine public

PIERRE DE FERMAT

© Audun Braastad (www.abelprize.no)

ANDREW WILES, EN 2016

d'Andrew Wiles a un sens, revenons à la notion de système formel. Les progrès de la logique mathématique ont conduit, au début du XXe siècle, à une situation étonnante et à vrai dire inattendue. On a réussi à identifier de manière parfaite les règles de raisonnement mises en œuvre en mathématiques, et à les exprimer de façon suffisamment précise pour que la vérification d'une démonstration, dont le mathématicien écrit chaque pas dans ce système de règles, soit faisable mécaniquement, c'est-à-dire sans intelligence. Aujourd'hui, bien sûr, ce « faisable mécaniquement » renvoie à des ordinateurs et des programmes informatiques.

Quand on s'intéresse aux nombres entiers, on tente de formaliser les raisonnements dans le système de l'arithmétique de Giuseppe Peano (qu'on notera PEANO) qui, en particulier, permet les raisonnements par récurrence. On envisage parfois des systèmes plus faibles, c'est-à-dire disposant de moins de moyens de raisonnement.

Pour traiter d'ensembles infinis d'entiers, de nombres réels comportant une infinité de décimales, de fonctions continues et d'objets plus riches encore tels que des ensembles de fonctions ou des espaces de dimension infinie, on envisage divers systèmes formels.

Plusieurs systèmes formels

Le système le plus souvent retenu est celui de la théorie des ensembles, formalisé au début du XXe siècle et noté ZFC pour « Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix ». Il permet de manipuler directement des objets infinis qui n'existent pas dans PEANO, mais il est plus puissant pour une autre raison : supposer que ZFC est non contradictoire permet de démontrer que PEANO est non contradictoire, alors que l'inverse est impossible.

Rarement, mais cela arrive, la théorie des ensembles usuelle ZFC n'est pas suffisante. Si, par exemple, on veut parler de toutes les fonctions, ou de tous les groupes et raisonner globalement sur leurs structures et les liens entre ce type de structures (c'est ce que fait la théorie des catégories), on rencontre une ennuyeuse difficulté. En effet, ni « L'ensemble de tous les ensembles », ni « L'ensemble de toutes les fonctions », ni « L'ensemble de tous les groupes », etc., ne sont des ensembles au sens de ZFC, qui ne connaît que les collections d'objets mathématiques de taille limitée. Exprimer les propriétés des grandes structures et les raisonnements qui les concernent exige alors des systèmes formels plus puissants. On utilisera par exemple ceux qu'on obtient à partir de ZFC en ajoutant des axiomes affirmant l'existence d'ensembles très grands.

Si l'énoncé de Fermat est indécidable, alors il est vrai !

Une question naturelle se pose à propos des énoncés arithmétiques E tels que celui affirmant que tout nombre pair à partir de 4 est somme de deux nombres premiers (conjecture de Goldbach) ou l'énoncé du théorème de Fermat : « Se peut-il que E soit indécidable, c'est-à-dire que ni E ni sa négation, non(E), ne soient démontrables ? »

La question, posée dans l'absolu, n'a pas de sens. Il n'y a pas de notion de démonstration dans l'absolu, mais seulement des notions relatives à des systèmes formels comme PEANO, ZFC ou INAC évoqués dans l'article. Il faut donc reformuler la question et se demander par exemple : Est-il possible que le système PEANO ne puisse démontrer ni E, ni non(E) ? Autrement dit : E est-il un indécidable de PEANO ?

On connaît des indécidables de PEANO (par exemple l'énoncé qui affirme que PEANO est non contradictoire). La question n'est donc pas absurde et c'est d'ailleurs cette question qui est posée par les recherches évoquées dans l'article à propos du théorème de Fermat. La plupart des mathématiciens pensent que l'énoncé de Fermat n'est sans doute pas un indécidable de PEANO, bien qu'aujourd'hui ce ne soit pas démontré.

Cependant, si, en utilisant par exemple les moyens de ZFC (ou INAC), on démontrait que l'énoncé de Fermat est indécidable dans PEANO, alors on disposerait automatiquement d'une nouvelle preuve du théorème de Fermat dans la théorie qui aurait prouvé l'indécidabilité.

En effet, PEANO a la propriété que tous les énoncés élémentaires du type « $3+7=10$ », « $2^3+3^3 \neq 5^3$ », « 13 est un nombre premier » sont démontrables dans PEANO quand ils sont vrais. PEANO ne passe à côté d'aucune démonstration pour des vérités arithmétiques aussi élémentaires.

La preuve dans ZFC (ou dans INAC) de l'indécidabilité dans PEANO du théorème de Fermat démontrerait, pour chaque quadruplet d'entiers n, x, y, z avec $n > 2$ et x, y, z non nuls, que PEANO n'établit pas $x^n + y^n = z^n$ (dans le cas contraire, PEANO fournirait un contre-exemple à l'énoncé de Fermat, lequel serait donc décidable), donc que PEANO démontrerait que $x^n + y^n \neq z^n$ (puisque PEANO ne manque aucun énoncé de cette forme). En simplifiant un peu : si l'énoncé de Fermat est indécidable, alors il est vrai.

La même propriété est vraie pour la conjecture de Goldbach. Celui qui démontrerait qu'elle est indécidable dans PEANO en utilisant les moyens d'un système formel F, démontrerait du même coup la conjecture de Goldbach dans le système F. Il ne serait donc pas très malin, face à la difficulté qu'on a à établir la conjecture de Goldbach, de se mettre à rechercher la preuve que la conjecture est indécidable dans PEANO. L'indécidabilité de ce type d'énoncés E dans PEANO est une affirmation plus difficile à prouver que E lui-même.

On adoptera par exemple l'axiome des « cardinaux fortement inaccessibles » qui autorise certaines formes d'ensemble de tous les ensembles et autres grosses collections. Notons INAC un tel système. Si l'on admet qu'il est non contradictoire, alors on sait démontrer que ZFC l'est aussi, alors que l'inverse est impossible.

Quand on passe de PEANO à ZFC puis à INAC, on accepte l'existence d'objets de plus en plus nombreux et gros, mais le monde mathématique supposé devient aussi plus difficilement contrôlable, et on peut même, au-delà d'un certain point (qui varie selon la sensibilité de chacun), considérer ces mondes mathématiques surabondants comme illusoires. Qu'il puisse exister des entités abstraites telles que les entiers est facile à accepter. Pour les nombres réels et leurs décimales qui se prolongent à l'infini, c'est un peu plus difficile, et certains physiciens considèrent ces nombres comme des fictions commodes sans contrepartie dans le monde réel. Passer au niveau supérieur avec INAC devient un peu déraisonnable, même si les mathématiciens réussissent à penser et à démontrer des choses dans ces univers follement étendus.

Ces trois points de repère, PEANO, ZFC, INAC, ne sont que des échelons d'une série plus riche de systèmes formels envisagés par les mathématiciens et les logiciens.

Ontologie risquée

Un système formel décrit un ensemble de possibilités de manipulations de formules qui donnent à l'arrivée les théorèmes. Il ne faut pas qu'il permette de démontrer une formule absurde du type $0 = 1$, qui serait en contradiction avec la formule $0 \neq 1$ (le système serait alors incohérent, « inconsistant » ou contradictoire). En effet, dès qu'on a une contradiction, tout devient vrai et tout devient faux à la fois : plus rien n'a de sens. Passer d'un système faible (par exemple PEANO) à un système plus puissant fait prendre des risques, puisqu'on accroît l'ensemble des énoncés que l'on peut démontrer.

On sait aussi que prouver qu'on ne prend pas de risques (de rencontrer une contradiction qui détruirait tout) est impossible ou nécessairement insatisfaisant. En effet, l'une des conséquences des théorèmes d'incomplétude de Gödel est que, pour démontrer qu'un système est non contradictoire, on doit se placer dans un système plus puissant (donc plus risqué !). S'élever dans la puissance des systèmes formels fait prendre des risques de non-sens.

Ainsi, lorsqu'on s'intéresse à des énoncés sur les entiers, il est souhaitable de ne pas s'aventurer à utiliser des objets infinis, ou, ce qui revient au même, il faut rester sagement dans PEANO ou un système formel sans infini plus faible encore.

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Le travail consistant à reprendre des preuves aux hypothèses ontologiques fortes pour les reconstruire dans des mondes mathématiques plus élémentaires, éventuellement sans infini, est donc un objectif raisonnable et, s'il est atteint, utile. En mathématiques, on a d'ailleurs toujours considéré que minimiser les hypothèses d'un résultat, c'est obtenir un meilleur résultat et une multitude de travaux publiés dans les revues professionnelles consistent à se débarrasser d'hypothèses qu'on a cru un moment nécessaires et qui se révèlent inutiles avec la nouvelle preuve.

Le célèbre théorème des nombres premiers qui donne leur densité et dont on dispose aujourd'hui de preuves formelles a été démontré dans un premier temps en utilisant des notions liées aux fonctions de variables complexes qui n'entrent pas dans PEANO. Les preuves de Jacques Hadamard et de Charles-Jean de La Vallée Poussin (1896) ont été reprises par Paul Erdős et Atle Selberg en 1948. Ils ont su en donner une version dite élémentaire ; en simplifiant un peu, ils ont transformé la preuve donnée initialement dans ZFC en une preuve donnée dans PEANO.

Personne n'a contesté que cette formulation de la preuve initiale dans un univers réduit était mathématiquement intéressante et Atle Selberg a obtenu une médaille Fields en 1950 en partie grâce à ce résultat. Se préoccuper du problème de ce qu'exige vraiment la preuve du grand théorème de Fermat est sans le moindre doute une authentique préoccupation mathématique.

Or, et c'est là le problème, la preuve formulée par Andrew Wiles utilise des notions et des résultats qui ne sont pas confinés à l'arithmétique de PEANO. Qui plus est, certains résultats dus en particulier à Alexandre Grothendieck et utilisés par Andrew Wiles ne prennent sens et n'ont été établis que dans des systèmes plus puissants que ZFC.

La démonstration publiée par Andrew Wiles en 1995 utilise des méthodes de géométrie algébrique. Cette discipline a connu des avancées considérables grâce aux travaux de Grothendieck, mort en 2014 après une vie de rebelle (*voir* Pour la Science *n° 467, septembre 2016*). On y considère des équations algébriques et l'ensemble de leurs solutions

Les univers d'Alexandre Grothendieck

Pour formuler et démontrer le théorème de Fermat, Andrew Wiles a utilisé des notions mathématiques (parfois seulement implicitement, en reprenant des résultats démontrés avant lui) qui n'ont de sens que dans une théorie logique (un système formel) plus puissante que celle des entiers. La théorie logique utilisée est même plus puissante que la pourtant très puissante théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix (ZFC), qui suffit à la plus grande partie des mathématiques.

La théorie utilisée par Andrew Wiles postule l'existence des « univers de Grothendieck », des ensembles U munis d'une relation d'appartenance « être dans » ayant les propriétés suivantes :

– si x est dans U, et que y est dans x, alors y est dans U (axiome de transitivité) ;

– si x et y sont dans U, alors la paire $\{x, y\}$ est dans U (axiome de la paire) ;

– si x est dans U, alors l'ensemble des sous-ensembles de x est aussi dans U (axiome de l'ensemble des parties) ;

– si $x \to f(x)$ est une fonction telle que x et chaque $f(x)$ sont dans U, alors la réunion de tous les $f(x)$ est aussi dans U (axiome de la réunion).

L'existence de ces univers ne peut pas être démontrée en utilisant seulement des raisonnements de ZFC, il faut ajouter à ZFC un axiome qui affirme l'existence d'ensembles très grands :

– plus grands que $\mathbb{N}$, l'ensemble des entiers ;

– plus grands que $P(\mathbb{N})$, l'ensemble des parties de $\mathbb{N}$;

– plus grands que l'ensemble $P(P(\mathbb{N}))$ des parties de $P(\mathbb{N})$, etc.

L'axiome d'existence de cardinaux fortement inaccessibles INAC bien connus des logiciens est équivalent à l'existence d'univers de Grothendieck. Cet axiome (contrairement à l'axiome du choix, ou à l'hypothèse du continu) a un effet sur les démonstrations concernant les entiers : certaines propriétés démontrables en l'utilisant et concernant exclusivement les entiers ne sont pas démontrables sans lui. La question de savoir si l'énoncé du théorème de Fermat est une telle propriété n'est pas évidente. Peu de mathématiciens envisagent que ce théorème exige vraiment d'utiliser INAC, mais prouver proprement qu'on peut se passer de INAC pour démontrer l'énoncé de Fermat n'est pas facile. Notons aussi qu'une partie importante des résultats forts de géométrie algébrique (dus à Grothendieck, Pierre Deligne, Gerd Faltings) utilisent aussi l'existence d'univers de Grothendieck.

Il est remarquable que la démonstration de résultats dont l'énoncé est compréhensible par tout le monde (comme celui de Fermat) et qui ne concernent que les entiers semble dépendre de l'existence d'infinis bien au-delà de tout ce que peut imaginer un être humain (à l'exception d'un logicien !). Si nous réussissons à prouver ces résultats sans utiliser ces univers extraordinaires de Grothendieck, alors cela se fera très certainement en compliquant les démonstrations et en les rendant moins naturelles, donc en procédant à l'opposé de tout ce que Grothendieck a toujours souhaité faire. Pour comprendre ce qui est simple, il faut s'élever dans d'extravagants mondes infinis.

Pour comprendre ce qui est simple, il faut s'élever dans d'extravagants mondes infinis

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

La grande conjecture de Harvey Friedman

Harvey Friedman est un mathématicien de l'université d'État de l'Ohio, aux États-Unis. Aujourd'hui à la retraite, il conserve une activité productive hors du commun. Il est mentionné dans le *Livre Guinness des records* comme ayant été, à 18 ans, le plus jeune enseignant de tous les temps à donner un cours à l'université Stanford.

S'intéressant aux fondements des mathématiques, il recherche des énoncés les plus concrets possible dont la preuve exige l'emploi d'axiomes stipulant l'existence de très grands ensembles infinis (axiomes de grands cardinaux). Il réussit assez bien, mais les énoncés de ce type qu'il découvre restent abstraits et jamais aussi simples que le théorème de Fermat. Ce qu'il trouve confirme cependant le bien-fondé des travaux de Colin McLarty visant à prouver que le théorème de Fermat n'exige pas d'axiomes forts sur l'infini.

Harvey Friedman semble penser que la distinction entre « concret et assez simple » et « très simple » dépend de la nécessité d'utiliser des axiomes affirmant l'existence de grands ensembles. Dans le cas du théorème de Fermat, il conjecture qu'il doit pouvoir se démontrer en utilisant des systèmes d'axiomes très faibles n'utilisant pas l'infini. Il a énoncé ce qu'on nomme aujourd'hui « la grande conjecture de Friedman », selon laquelle tous les théorèmes d'arithmétique qui intéressent spontanément les mathématiciens (donc à l'exclusion des résultats de logique, ou des énoncés construits artificiellement afin qu'ils exigent des axiomes forts) sont démontrables en utilisant un système où l'infini ne joue aucun rôle direct. S'il a raison, il faudra comprendre pourquoi ce qui intéresse les mathématiciens reste dans un secteur limité de complexité et définir avec précision ce secteur. Harvey Friedman exprime son point de vue ainsi : « Le défi le plus intéressant concernant les fondements des mathématiques est de trouver des énoncés portant sur les entiers et dont la démonstration dépende de manière incontournable des univers [de Grothendieck]. »

HARVEY FRIEDMAN

(ce sont des objets géométriques : par exemple, l'équation $x^2 + y^2 = 1$ définit un cercle), et on raisonne globalement sur ces structures.

Malheureusement, les travaux de Grothendieck sortent du cadre usuel de la théorie des ensembles telle que ZFC la formalise, car les outils que ce mathématicien de génie a introduits et manipulés sont d'une abstraction extrême qui exige par exemple qu'on parle sans contrainte d'objets tels que la collection de tous les groupes.

Un axiome aujourd'hui bien étudié sur lequel s'appuie Grothendieck affirme l'existence de ce qu'il appelle des « univers » *(voir l'encadré page 81)*. Cet axiome lui permet de manipuler dans ses démonstrations non seulement les entiers eux-mêmes, mais aussi les ensembles d'entiers, et les ensembles de tels ensembles d'entiers, et toute une hiérarchie de structures d'une abstraction inhabituelle en mathématiques. Cette théorie des catégories dont Grothendieck fait un usage systématique pour ses raisonnements ne se trouve à l'aise qu'en postulant ces « univers » dont les logiciens savent depuis longtemps qu'on ne peut en démontrer l'existence dans le cadre de ZFC. En clair, puisque Andrew Wiles s'appuie sur ces résultats postulant l'existence des cardinaux fortement inaccessibles, sa preuve n'a de sens que dans une théorie très forte qui semble être INAC.

« Tout le monde voit que c'est là une méthode précipitée et grossière », commente Colin McLarty, de l'université de Cleveland. Ce dernier est professeur de philosophie, mais très compétent en mathématiques et en logique : il a régulièrement publié dans les meilleures revues de ces disciplines et il est membre du « Grothendieck Circle » qui travaille à rendre accessible sur Internet les travaux de Grothendieck.

Prouver avec moins

Il s'est ainsi attaqué à la question : peut-on faire baisser le niveau des hypothèses implicites de la démonstration de Wiles ? Dit autrement, peut-on la faire reposer sur des formalismes plus faibles que INAC, ou même que ZFC ?

Colin McLarty précise que « Les grands cardinaux en tant que tels n'étaient ni intéressants ni problématiques pour Grothendieck [...]. Pour lui, ils n'étaient que des moyens légitimes pour accéder à quelque chose d'autre. Il voulait organiser l'arithmétique et ses calculs dans un monde conceptuel géométrique. Il a trouvé un moyen de le faire avec la cohomologie [une méthode algébrique abstraite] et l'a utilisée pour concevoir des outils de calcul qui, auparavant, avaient échappé aux meilleurs mathématiciens tentant de résoudre les conjectures de Weil [démontrées en 1974 par Pierre Deligne en utilisant les outils créés par Grothendieck]. Il a ainsi posé les bases de la géométrie algébrique moderne. [...] Sa cohomologie s'appuie sur les univers, mais des fondements plus faibles devraient suffire même si y recourir entraîne la perte d'une certaine élégance conceptuelle. [...] Il n'y a aucune absurdité à considérer les univers inutiles en principe, et utiles en pratique. »

Colin McLarty expose une méthode pour construire une preuve du grand théorème de Fermat entièrement dans ZFC. Pour l'essentiel, elle consiste à utiliser des théories des ensembles prudentes, comme celle proposée par John von Neumann, Paul Bernays et Kurt Gödel (notée NBG). Ces théories autorisent la manipulation de gros

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

ensembles en ne les assimilant pas à de simples ensembles : il y a donc deux types de collections différentes. Bien qu'un peu compliquées et parfois jugées artificielles, ces théories permettent, dans un système équivalent en force à ZFC, de faire ce que les univers de Grothendieck font. On a donc, moyennant quelques complications, et sans prendre les risques liés à INAC, un monde mathématique autorisant la démonstration du théorème de Fermat.

Une autre méthode proposée récemment par Colin McLarty, fondée sur l'étude de ce qui est vraiment indispensable de ZFC pour disposer des théories arithmétiques de Grothendieck, permet en théorie de formaliser la preuve dans un système d'une force comprise entre celle de PEANO et celle de ZFC. Mais ce n'est pas encore pleinement satisfaisant. Une autre approche, esquissée par Angus Macintyre, permettrait de démontrer le théorème de Fermat dans PEANO, soit mieux que ce que propose McLarty. Son idée est que les objets du monde continu utilisés dans la démonstration peuvent être obtenus comme des limites d'objets définissables à partir des entiers. Un nombre réel, par exemple, est la limite des nombres décimaux correspondant à ses chiffres pris progressivement : ainsi, π est la limite de (3 ; 3,1 ; 3,14 ; 3,141 ; ...).

En procédant systématiquement par cette méthode, on doit pouvoir ramener la preuve d'Andrew Wiles et toutes celles antérieures dont il a besoin dans son travail à des mathématiques entièrement situées dans PEANO. Il ne suffit pas de le dire, il faut le faire et ce très soigneusement. Angus Macintyre a proposé quelques détails dans un texte d'une dizaine de pages sur la façon de mettre en œuvre sa méthode, et il semble avoir convaincu plusieurs spécialistes que ces réductions fonctionnent. Mais le travail définitif reste à faire pour être certain qu'aucun obstacle inattendu ne s'interpose.

On le voit, on n'a pas fini de travailler sur la démonstration d'Andrew Wiles et sur les théories de Grothendieck.

Notons pour finir qu'il existe des systèmes plus faibles que PEANO, en particulier le système EFA (pour *Exponential Functional Arithmetics*), où l'on n'autorise les raisonnements par récurrence que pour une classe limitée de formules simples. Le système EFA semble d'ailleurs la vraie limite pour démontrer le théorème de Fermat.

On sait en effet qu'en allant plus bas, les systèmes qu'on définit naturellement pour l'arithmétique ne permettent pas tous de démontrer ce théorème. Une autre raison pour s'intéresser à EFA est une conjecture proposée par un mathématicien respecté, selon laquelle EFA suffirait pour l'essentiel des résultats arithmétiques vraiment intéressants. La « grande conjecture de Harvey Friedman » affirme ainsi que tous les résultats d'arithmétique dont on trouve la démonstration dans la revue *Annals of Mathematics* (où a été publiée la preuve d'Andrew Wiles) sont démontrables dans EFA.

EFA, système ultime ?

La formulation de cette conjecture est un peu étrange, puisqu'elle n'envisage qu'une classe d'énoncés définie par les publications d'une revue, ce qui n'est pas très mathématique et variera dans le temps quand de nouveaux articles seront publiés. L'idée est cependant claire : on sait, en utilisant des méthodes logiques ou de la théorie de Ramsey, construire des formules d'arithmétique non démontrables dans EFA et même dans PEANO, mais démontrables dans des systèmes plus forts. Pas question donc d'affirmer que tout résultat arithmétique se démontre dans EFA. Cependant, la revue *Annals of Mathematics,* qui est une revue de mathématiques pures, ne publie pas ce type de résultats jugés artificiels. Ce qu'elle publie est limité au cœur des mathématiques. Et selon la grande conjecture de Harvey Friedman, cela n'exige jamais plus que EFA.

Avant de savoir si Harvey Friedman a raison et comment caractériser précisément les choix de la revue *Annals of Mathematics*, il faudra mieux comprendre les hypothèses implicites des théories de Grothendieck, les démonstrations comme celles d'Andrew Wiles et la mise en forme des réductions esquissées aujourd'hui. Ce chemin sera riche en leçons et utile pour produire des preuves vérifiables par ordinateur de ce domaine mathématique qu'à l'heure actuelle on ne sait pas formaliser explicitement. ■

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

Dernier ouvrage paru : *Mathématiques et mystères*, une intrigante sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2016).

BIBLIOGRAPHIE

P. Glivický et V. Kala, **Fermat's Last Theorem and Catalan's conjecture in weak exponential arithmetics**, prépublication arXiv:1602.03580, 2016.

W. Hesselink, **Computer verification of Wiles' proof of Fermat's Last Theorem**, www.cs.rug.nl/ffwim/fermat/wilesEnglish.html, 2016.

C. McLarty, **The large structures of Grothendieck founded on finite order arithmetic**, prépublication arXiv:1102.1773, 2014.

A. Macintyre, **The impact of Gödel's incompleteness theorems on mathematics**, dans *Kurt Gödel and the Foundations of Mathematics*, pp. 3-25, Cambridge Univ. Press, 2011.

J.-P. Delahaye, **Du rêve à la réalité des preuves**, *Pour la Science* n° 402, pp. 90-95, avril 2011.

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

L'imaginaire des profondeurs

Les lunes de Jupiter hébergeant de l'eau liquide et les lointaines exoplanètes sont autant de lieux mystérieux à découvrir. Tout comme les fonds des océans terrestres qui restent largement inexplorés.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ. Illustration : Marc BOULAY

Sans l'eau, la vie telle que nous la connaissons ne serait peut-être pas apparue il y a environ 3,8 milliards d'années. En effet, cet élément joue un rôle fondamental dans de nombreux processus biochimiques. En est-il de même sur d'autres planètes ? Nous sommes encore loin de pouvoir répondre à cette question, mais l'eau cache d'autres énigmes et des mondes mystérieux… très proches de nous à l'échelle de l'Univers.

Car si l'eau recouvre près de 71 % de la surface de la Terre, les profondeurs des océans terrestres demeurent moins connues que la surface de la Lune ou de Mars. Nous avons donc tout autant à découvrir et explorer directement sous nos pieds que sur des corps célestes éloignés.

En attendant de cartographier plus précisément les fonds marins, l'inconnu qui nimbe ces régions constitue autant de prétextes à l'imaginaire. Un imaginaire qui rejoint parfois la réalité. Chaque plongée abyssale ramène son lot de nouvelles espèces extraordinaires et inconnues, de hideux poissons-lanternes, d'amusantes pieuvres dumbo ou d'étranges vers fixés à des cheminées volcaniques. Ce bestiaire extrêmophile constitue un véritable « monde perdu » sous-marin digne des romans d'Arthur Conan Doyle ou de Jules Verne.

Peut-être les aventures de James Cameron nous inciteront-elles à explorer les fonds marins. Le célèbre réalisateur est le troisième homme au monde à avoir atteint le site Challenger Deep de la fosse des Mariannes, au large du Japon : en 2012, il est descendu seul, dans son bathyscaphe, à 10 898 mètres, à deux doigts du record mondial (10 916 mètres) détenu depuis 1960 par le Suisse Jacques Piccard et l'Américain Don Walsh.

Les fonds des océans terrestres sont **moins connus que la surface de la Lune ou de Mars**

Pour réaliser son exploit, James Cameron s'est probablement imaginé dans la peau de Bud, personnage de son film *Abyss* (1989) qui rencontre à très grande profondeur des extraterrestres aquatiques, pacifiques et capables de manipuler l'eau liquide. Notons au passage que la morphologie de ces extraterrestres bioluminescents est inspirée de celle des béroés, organismes marins bien réels et cousins des méduses.

Une autre région terrestre en cours d'exploration est celle des lacs subglaciaires de l'Antarctique, tel le lac Vostok (situé à 4 000 mètres sous la glace), atteints par des forages où l'on a trouvé de la vie sous la forme de bactéries extrêmophiles. Ces lacs évoquent les océans d'eau liquide présents sur d'autres corps célestes gelés, comme Europe, une lune de Jupiter. Ces océans, coincés entre une épaisse couche de glace et un socle rocheux, hébergent peut-être aussi la vie.

Peut-on imaginer une planète dont la partie interne serait remplie d'eau liquide et dépourvue de noyau rocheux ? Ces océans internes hypothétiques posent d'intéressantes questions de planétologie et de géologie : pour rester au centre de la planète, cette masse d'eau devrait être plus dense que la croûte continentale. Certes, nous avons l'impression de flotter sur la mer Morte

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

© 2017 Marc Boulay/marcboulay.fr/possima-productions.com

LES TRÉSORS DES FONDS ABYSSAUX restent encore à découvrir. Il en est ainsi de la faune bioluminescente, des organismes capables de produire de la lumière grâce à des processus chimiques.

grâce à sa forte salinité (275 grammes par litre, dix fois plus que la moyenne). Mais même un océan hypersalé ne peut atteindre une densité suffisante pour que des îlots de terre et de roches y flottent.

Certaines fictions imaginent de tels mondes, comme la cité Otoh Gunga sur la planète Naboo dans *Star Wars I* (George Lucas, 1999). Mais il est plus probable que cette ville se situe dans un karst géant (un vaste plateau calcaire très érodé et creusé de grottes) rempli d'eau.

Quoi qu'il en soit, ces mondes imaginaires sont souvent empruntés à l'idée fausse de la « Terre creuse », selon laquelle tout un monde se cacherait sous nos pieds.

Les œuvres de science-fiction, des *blockbusters* hollywoodiens aux grands classiques de la littérature, regorgent de mondes aquatiques : Solaris et son océan pensant du fameux roman de Stanislas Lem (1961), la planète Miller dans *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014), Aquablue ou Aldebaran des bandes dessinées éponymes, ou encore Kronos dans *Star Trek* sont autant de « planètes océans ». Certains nous renvoient l'image d'une Terre malade, en proie à un réchauffement climatique global. C'est le cas de *Waterworld* (Kevin Reynolds, 1995), sorte de *Mad Max* aquatique censé se dérouler sur une Terre dévastée et quasi submergée par la montée généralisée des eaux.

Les mers et les océans, qu'ils soient fictifs ou réels, sont aussi les lieux privilégiés de monstres géants. Sur Terre, le gigantisme peut être favorisé par des processus d'isolement, comme ce fut le cas de petits rongeurs devenus géants sur les îles Gargano (en Italie) il y a 5 à 6 millions d'années environ (on parle alors de gigantisme insulaire).

Dans le milieu aquatique, c'est plutôt la poussée d'Archimède qui autorise aux animaux d'atteindre des tailles et des masses considérables : le record actuel est détenu par la baleine bleue *(Balaenoptera musculus)* dont le plus grand spécimen jamais mesuré était une femelle de près de 30 mètres et 177 tonnes ! Sur la terre ferme, la gravité impose sa loi : la masse maximale qu'un vertébré terrestre pourrait atteindre est estimée à environ 130 tonnes – le plus grand dinosaure, connu par une seule vertèbre, aurait pesé environ 122 tonnes d'après les reconstitutions.

Celui qui hantait les ténèbres

Dans l'eau, les auteurs de fictions s'en donnent à cœur joie. Béhémoth, Godzilla, Léviathan ou encore Cthulhu... Ce bestiaire de monstres géants, visqueux, tentaculaires ou protéiformes ne reflète rien de moins que nos peurs et nos fantasmes.

Autrefois, combien de navigateurs pensaient avoir échappé au « serpent de mer » alors qu'ils croisaient un régalec *(Regalecus glesne)*, le plus long poisson osseux du monde (5 mètres en moyenne). Idem pour les siréniens (dugongs et lamantins), paisibles mammifères aquatiques à peau claire et interprétés autrefois comme des sirènes. Les profondeurs océaniques sont donc aussi des lieux de spéculations face auxquelles il convient d'être sceptique tout en restant ouvert : le kraken, espèce cryptozoologique par excellence, n'est-il pas aujourd'hui nommé *Architeuthis* (et *Mesonychoteuthis* pour le genre austral) par les biologistes marins ?

Outre leur anatomie ou leur taille, ces monstres imaginaires ou réels sont intéressants parce qu'ils occupent aussi une place importante dans une chaîne alimentaire donnée (les écologues parlent de « réseau écotrophique ») : dans *Star Wars*, le submersible des Jedis est happé par l'Opee Sea Killer, poisson-crabe géant qui se fait lui-même croquer par le Sando, titanesque dragon des mers.

Mais oublions un instant notre monde carboné et son modèle géocentré stipulant que « l'eau, c'est la vie » : n'y a-t-il pas un autre solvant qui pourrait être aussi vital pour d'autres formes extraterrestres ? Isaac Asimov, biochimiste et auteur de science-fiction, imaginait une vie dans de glacials océans de méthane ou d'hydrogène. Certains exobiologistes misent sur l'ammoniac ou le fluorure d'hydrogène : autant de biochimies hypothétiques qui augurent peut-être des océans de découvertes ! ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Terminator et la petite fleur

Plantoïd *est une fleur bionique qui vit de façon autonome grâce à un programme informatique décentralisé. Détachée de tout contrôle, elle rassemble les propriétés de* Skynet, *l'intelligence artificielle qui cherche à se débarrasser des humains dans les films* Terminator.

Loïc MANGIN

C'est une fleur, une simple fleur métallique dont le cœur, parfois, vibre et brille. Elle ne paye guère de mine, et pourtant… Les principes sur lesquels elle est fondée sont, pour certains spécialistes, les germes d'une révolution sans précédent qui ne demande qu'à éclore : les premiers bourgeons sont déjà là.

Plantoïd – la fleur en question – est le fruit d'un projet artistique élaboré par le collectif O'Khaos, fondé par Primavera de Filippi, par ailleurs chercheuse du CNRS au CERSA (Centre d'études et de recherches de science administrative) et au Berkman Center for Internet & Society, de l'université Harvard, aux États-Unis. L'œuvre a été présentée la première fois en 2015 au festival *Ars Electronica*, à Linz, en Autriche, et a depuis fait des petites pousses…

Elle consiste en une sorte de fleur qui se nourrit à plusieurs sources ayant pour noms *blockchain*, organisation autonome décentralisée, bitcoin… Lesquelles constituent le terreau de la révolution annoncée.

Une *blockchain* est une base de données distribuée sur de nombreux ordinateurs répartis dans le monde (c'est un réseau pair à pair) et dans laquelle des transactions sont enregistrées chronologiquement : une telle architecture décentralisée et sans intermédiaire garantit l'inviolabilité de ce qui est inscrit. Le principe de la *blockchain* a été inventé en 2009 par un dénommé Satoshi Nakamoto pour asseoir le bitcoin, une monnaie virtuelle. Un vrai succès, car la capitalisation en 2017 atteint 19 milliards d'euros. Le concept initial de *blockchain* (un simple registre) a ensuite été généralisé et il offre aujourd'hui de nombreuses possibilités. Par exemple, le Ghana a mis en place un cadastre fondé sur une *blockchain*. Certains prédisent la disparition de métiers tels que notaire, banquier, etc., rendus obsolètes par les systèmes à *blockchain*.

Aujourd'hui, une *blockchain* ne se contente plus de contenir des données, elle peut aussi intégrer des programmes informatiques complexes. On obtient alors un ordinateur réparti sur le réseau et non contrôlé. Connectez des objets à cette architecture et vous obtenez une organisation autonome décentralisée, un dispositif intelligent capable d'échanger de la valeur sans intermédiaire. C'est exactement ce qu'est *Plantoïd*, qui est à la plante ce que l'androïde est à l'être humain, un équivalent bionique.

Un être hybride, qui existe à la fois dans le monde réel et dans le monde virtuel, et qui utilise les humains pour se reproduire

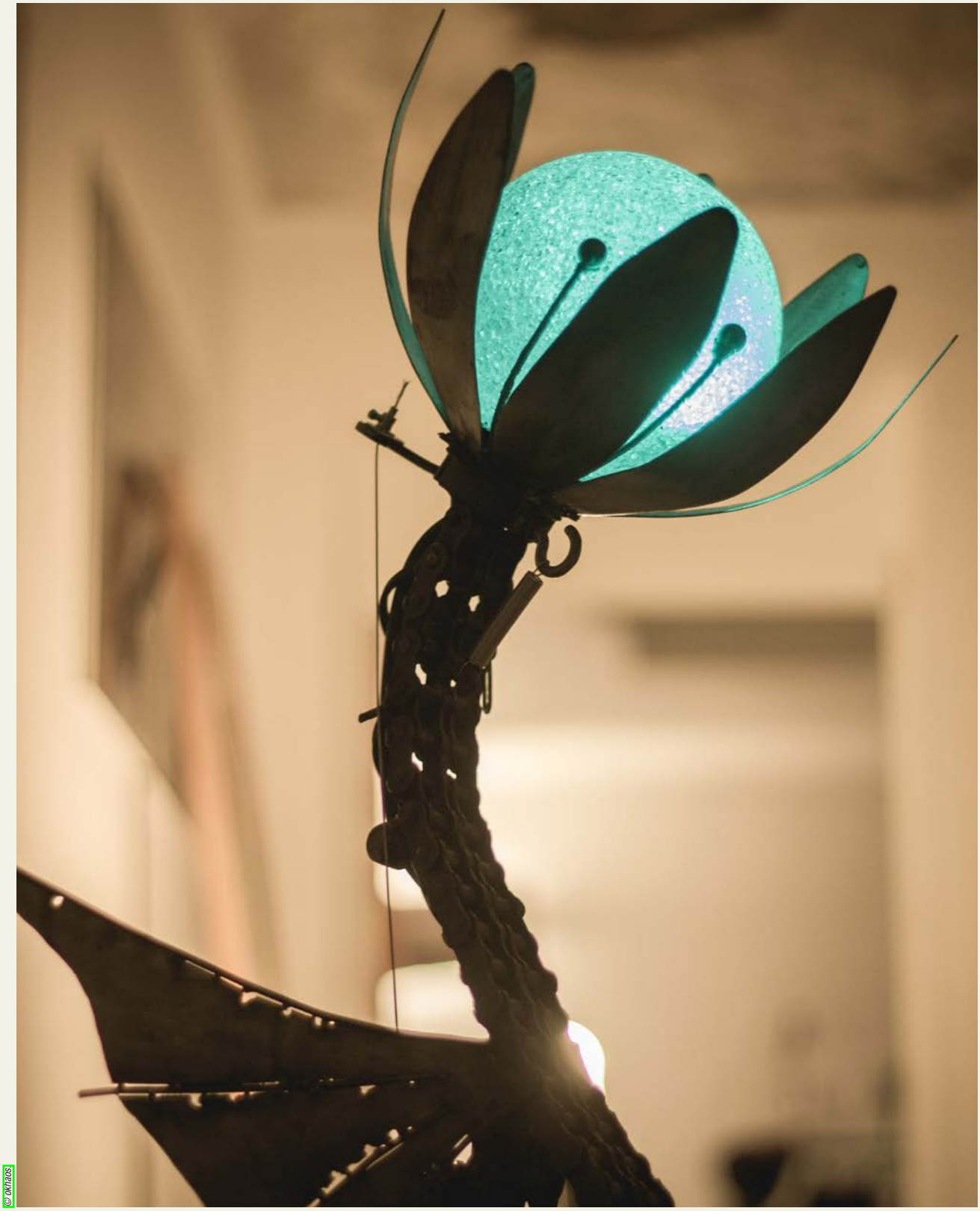
L'œuvre est ainsi une sculpture en forme de fleur, équipée d'un ordinateur intégré dans une *blockchain*. On associe ainsi un corps et un « esprit ». Elle vous plaît ? Montrez-le en alimentant *Plantoïd* avec des bitcoins ! Une fois qu'elle a collecté un montant donné fixé, elle va inviter des artistes, des designers, des développeurs et même des ferrailleurs, des électriciens à réfléchir à la prochaine génération de *Plantoïd*, que ce soit sur les aspects physiques ou informatiques. Pour choisir parmi les différentes propositions, elle s'appuiera sur les conseils des individus qui ont participé au financement. Les artisans retenus seront rémunérés, en bitcoins, par la plante elle-même. On compte aujourd'hui six *Plantoïd* qui ont été créées par ce système depuis la fleur originelle. L'évolution est en marche !

Étonnamment, du strict point de vue de sa conception et de son mode de reproduction, une *Plantoïd* n'appartient à personne. Plus précisément, elle s'appartient à elle-même et vit sa propre vie de façon autonome. On ne peut pas acheter une *Plantoïd*. Elle utilise les humains pour se reproduire, un peu à la façon des plantes naturelles avec les abeilles. Selon Primavera de Filippi, les humains sont devenus des pollinisateurs d'un être hybride qui existe à la fois dans le monde réel et dans le monde virtuel.

Autonome, décentralisée, dénuée de tout contrôle… C'est le portrait de *Skynet*, l'intelligence artificielle des films *Terminator* où l'humanité tout entière est décrétée obsolète. Sans être banquier ni notaire, nous avons peut-être intérêt à suivre de près cette révolution promise… ■

Le site dédié à *Plantoïd* :
http://www.okhaos.com/plantoids/
Des articles de *Pour la Science* sur le thème :
http://bit.ly/PLS-BloBit

© Pour la Science - n°475 - Mai 2017



© DR/ADS

Dans quelle société souhaitons-nous vivre ?

Les algorithmes sont probablement le premier outil à la mesure de nos aspirations.

Cessons de les subir, en cherchant à les comprendre.

Serge Abiteboul et Gilles Dowek

192 p. - 17 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr

Éditions Le Pommier

Gilles Dowek : ©Sébastien Dolidon ; Serge Abiteboul : ©INRIA

IDÉES DE PHYSIQUE

Les infidèles micros de la guitare électrique

Grâce à des capteurs électromagnétiques bien placés, une guitare électrique produit des sons que l'instrumentiste peut largement moduler.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pas facile de faire entendre sa guitare sèche dans un groupe de jazz ! Pour avoir répondu à cette attente dans les années 1930, les ingénieurs de chez Gibson avaient-ils imaginé qu'ils créeraient un instrument de musique aussi populaire ? De l'ES-150 de Charlie Christian à la Fender Stratocaster de Jimi Hendrix, la guitare électrique émet sa musique partout. Mais comment ? On se pose la question quand on remarque que cette guitare est dépourvue de caisse de résonance, structure responsable de l'amplification du son des cordes dans les instruments classiques *(voir l'illustration ci-contre)*.

Des cordes et des frettes

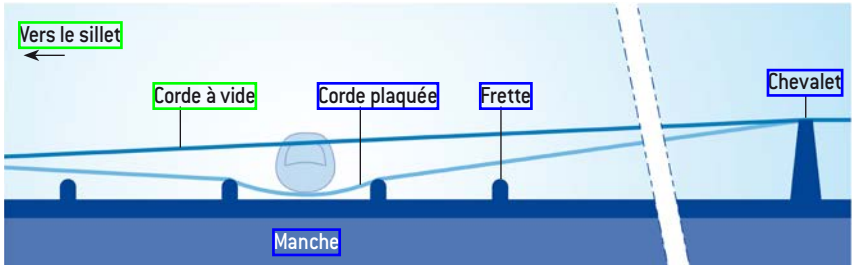
Transformer une corde en instrument de musique est facile. Il suffit de la tendre, puis de la faire vibrer en la frappant (piano), en la frottant (violon) ou en la pinçant (guitare). La perturbation se propage le long de la corde et effectue des allers et retours en se réfléchissant aux extrémités. Le résultat est un mouvement périodique de la corde. Plus précisément, ce mouvement est une superposition (une somme) d'oscillations sinusoïdales à des fréquences égales aux multiples entiers d'une fréquence fondamentale.

C'est cette fréquence fondamentale (inverse de la période) qui définit la hauteur de la note. Les amplitudes relatives des différentes « harmoniques » (les oscillations aux fréquences multiples de la fondamentale) déterminent le timbre de l'instrument. Pour une longueur de corde donnée, la fréquence sera d'autant plus grande, et donc la note plus aiguë, que la corde est tendue ou que sa masse par unité de longueur est faible.

Ainsi, sur une guitare, les six cordes, bien que de même longueur, peuvent produire six notes différentes. Pour obtenir davantage de notes, il suffit de plaquer les cordes contre le manche avec les doigts pour réduire la longueur mise en vibration. Cela diminue le temps d'aller-retour de la vibration de la corde et augmente donc la fréquence des oscillations. Ainsi, en pressant une corde en son milieu, on double la fréquence, c'est-à-dire que l'on joue une note à l'octave.

Dessins de Bruno Vacaro

UNE CORDE QUI VIBRE PRODUIT UN SON TRÈS FAIBLE. Dans un instrument classique, tel l'oud arabe *(à droite)*, ce son est amplifié grâce au couplage entre la vibration de la corde et celle de la caisse de résonance. Dans une guitare électrique, c'est le mouvement des cordes lui-même qui est traduit en signaux électriques, lesquels sont ensuite transformés en sons par des haut-parleurs.



LORSQUE LE DOIGT PLAQUE LA CORDE contre le manche de l'instrument, il raccourcit la longueur de la corde mise en vibration, ce qui augmente la fréquence sonore fondamentale et produit un son plus aigu que pour la corde entière. Pour un instrument à frettes, comme la guitare ou le luth, la longueur sélectionnée est la distance entre le chevalet et la dernière frette avant le doigt.

Sur le violon ou l'oud, la position du doigt peut varier de manière continue ; cela permet de faire des vibratos, mais la pratique de l'instrument est délicate. Il est plus facile de jouer juste sur un instrument qui comporte des frettes. Ces petites barres de métal incrustées dans le manche sont légèrement surélevées : si vous pressez convenablement la corde entre deux frettes – et peu importe la position précise de votre doigt –, la corde sera immobilisée au niveau de la frette la plus proche du chevalet *(voir la figure ci-dessus)*. Les frettes imposent donc des longueurs bien définies de la partie vibrante de la corde et, convenablement disposées, permettent de jouer des gammes.

Un « micro » magnétique

Mais la corde ne fait pas tout : sa vibration produit un son très faible, car elle agit très peu sur l'air qui l'entoure. La solution habituelle est de coupler mécaniquement cette vibration à une grande surface associée à une caisse de résonance creuse, comme avec une guitare classique.

Et dans une guitare électrique ? Ici, les vibrations de chaque corde sont directement converties en signaux électriques par un capteur électromagnétique, qu'on nomme usuellement « micro », bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'un microphone (dispositif censé capter un son). Les signaux électriques sont amplifiés afin de faire vibrer la membrane de haut-parleurs, avec en bonus la possibilité de traiter électroniquement le son pour obtenir le timbre et la sonorité désirée.

Le « micro » est composé d'un aimant (ou plusieurs) autour duquel un fil de cuivre très fin est enroulé et forme une bobine. L'aimant magnétise la portion de la corde placée juste au-dessus *(voir la figure page ci-contre)*, cette dernière étant en acier ou en nickel (des matériaux ferromagnétiques). Lorsque la corde vibre, le petit champ magnétique dû à son aimantation varie au niveau de la bobine. En vertu des lois de l'induction électromagnétique, il engendre alors aux bornes de la bobine une tension électrique.

Ainsi, le principe de la conversion est simple. Mais la relation entre les vibrations de la corde et le courant produit l'est beaucoup moins. Tout d'abord, ce courant n'est pas proportionnel à l'amplitude des vibrations, car les champs magnétiques sont très inhomogènes aux échelles considérées : quand la corde s'éloigne du capteur, elle se retrouve dans une zone de champ magnétique plus faible. Le petit aimant induit sur la corde devient donc à la fois moins puissant et plus distant de la bobine. Et c'est l'inverse quand la corde se rapproche. Ces variations, qui se répercutent sur la tension induite, peuvent rendre le son très puissant, avec de fortes non-linéarités qui enrichissent le son en harmoniques élevées.

Ensuite, le capteur agit mécaniquement sur les cordes, puisque son aimant permanent attire le morceau de corde aimanté. Cet effet amortit les vibrations de la corde et peut rendre le son beaucoup moins persistant. Par ailleurs, la corde peut vibrer parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de la bobine. La tension induite sera, dans le premier cas, beaucoup plus élevée (typiquement d'un facteur 10) que dans le second, car la variation du champ magnétique sera plus importante. Le « micro » traduira donc très différemment le jeu du guitariste selon la façon dont il gratte la corde, avec ou sans médiator.

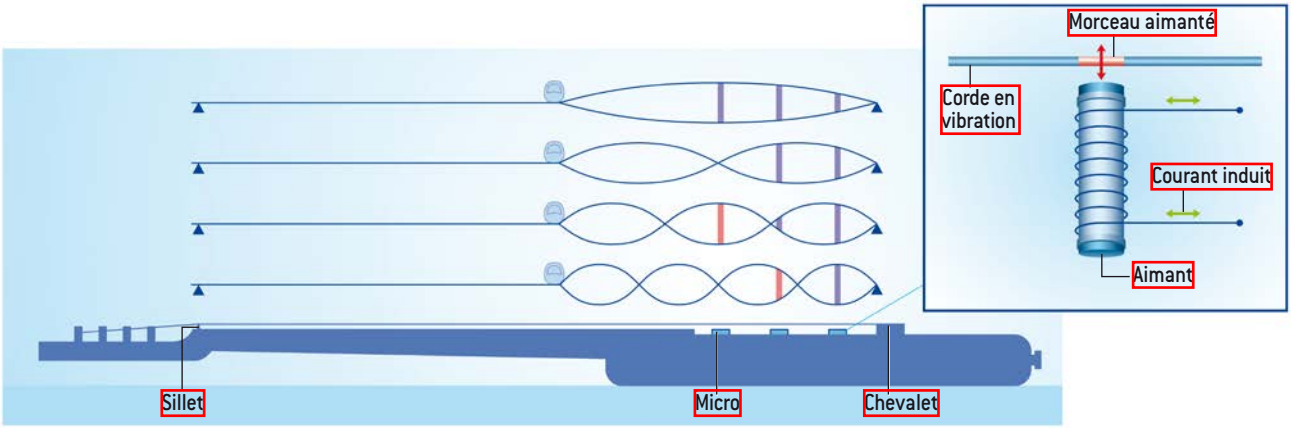
LES AUTEURS

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique.

Leur dernier ouvrage : *En avant la physique !*, un recueil de leurs meilleures chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Retrouvez la rubrique idées de physique sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017



CHAQUE « MICRO » D'UNE GUITARE ÉLECTRIQUE est un capteur électromagnétique, qui aimante le morceau de corde situé face à lui. Le mouvement de ce morceau de corde, en faisant varier le champ magnétique au niveau du capteur, induit un courant électrique dans la bobine de celui-ci. Par ailleurs, pour chaque mode d'oscillation *(de haut en bas : le mode fondamental et les trois harmoniques suivantes)* de la corde, les trois « micros » captent des oscillations d'amplitudes différentes *(traits verticaux ; le rouge indique ici une oscillation en opposition de phase)* en fonction de leurs positions. Ils conduisent donc à des sons de timbres différents à partir de la même corde en vibration.

Enfin, il ne faut pas oublier l'influence de la vitesse de la corde sur la tension induite, effet qui favorise encore les hautes fréquences. Et c'est sans compter que le capteur se comporte comme un oscillateur électrique, qui a sa propre fréquence de résonance et son propre taux d'amortissement. On comprend donc le soin méticuleux avec lequel un guitariste règle son « micro » !

Combiner les micros

Ou plutôt ses micros, car, comme on le constate sur la Stratocaster, il y en a trois pour chaque corde : le micro manche, le micro intermédiaire et le micro chevalet. Pour comprendre l'intérêt de cette multiplicité, regardons d'abord le mode fondamental d'une note jouée sur la guitare *(voir la figure ci-dessus)*. L'amplitude de la vibration de la corde est plus élevée au niveau du micro manche qu'au niveau du micro chevalet : cela signifie que, pour un réglage identique par ailleurs, ce mode est plus présent dans le son du premier micro que dans le second.

Considérons maintenant une harmonique, la troisième. Au niveau du micro chevalet, la vibration est accentuée par rapport au mode fondamental, tandis que son amplitude est pratiquement nulle au niveau du micro manche ; et pour le micro intermédiaire, la vibration est en opposition de phase par rapport aux deux autres.

On voit ainsi que le micro chevalet conserve toutes les fréquences et favorise les plus élevées. Le son de ce micro est donc plus agressif, plus aigu. Le micro manche, lui, conserve bien les basses fréquences et élimine certaines harmoniques. On l'utilise pour avoir un son plus rond, plus grave.

Dans la Stratocaster, un raffinement vient enrichir ces sonorités : le micro chevalet est incliné d'une dizaine de degrés vers le manche et capte plus facilement le mode fondamental des cordes les plus hautes (les plus graves) tandis que le micro intermédiaire est très légèrement incliné vers le chevalet, ce qui au contraire gonfle un peu en harmoniques ces notes graves.

Mieux encore, la Stratocaster est dotée d'un sélecteur qui permet de choisir entre ces trois micros, ou une combinaison d'un des micros extrêmes avec le micro intermédiaire : les possibilités sonores en sont multipliées d'autant.

Ainsi, paradoxalement, ce n'est pas tant pour leur fidélité de restitution du mouvement des cordes que l'on conserve ces micros magnétiques (des capteurs optiques disponibles depuis une vingtaine d'années feraient mieux l'affaire), mais plutôt pour leurs infidélités, qui contribuent à la variété des sons des guitares électriques… ou des ouds électriques que l'on commence à voir depuis quelques années. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Perov *et al.*, **The physics of guitar string vibrations**, *American Journal of Physics*, vol. 84(1), pp. 38-43, 2016.

A. U. Case *et al.*, **Electric guitar – A blank canvas for timbre and tone**, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, article 015039, 2013.

N. G. Horton et T. R. Moore, **Modeling the magnetic pickup of an electric guitar**, *American Journal of Physics*, vol. 77(2), pp. 144-150, 2009.

QUESTION AUX EXPERTS

Avaler un corps étranger est-il dangereux ?

L'ingestion d'un objet est le plus souvent anodine, sauf si cet objet est tranchant, volumineux ou chimiquement actif.

Bernard SCHMITT

©Shutterstock.com/VIA PTA

L'ingestion de corps étrangers se rencontre surtout chez les enfants, les personnes âgées et en milieu psychiatrique. L'enfant, pour lequel les actions de prévention sont essentielles, ingère le plus souvent des pièces de monnaie, des médailles, des épingles, des piles, des crayons, des parties de jouets. Chez l'adulte, les corps étrangers avalés et posant un problème sont majoritairement d'origine alimentaire : os, arêtes de poisson, gros morceau de viande, voire… dentier.

Un tel événement expose à deux complications principales : la perforation du tube digestif (par une lame de rasoir, un couteau, un clou, une clé, etc.) et l'occlusion intestinale (due à un gros objet). Chez l'adulte, le blocage d'un corps étranger ou d'un aliment permet de découvrir dans presque 40 % des cas un facteur de risque préexistant tel qu'une sténose peptique (un rétrécissement de l'œsophage) ou néoplasique (rétrécissement dû à une prolifération cellulaire), des diverticules (formation de poches sur les muqueuses intestinales), une hernie hiatale (remontée de l'estomac à travers le hiatus œsophagien).

Que faire en cas d'ingestion ? Tout dépend du diagnostic posé d'emblée. En cas d'ingestion de petits objets non tranchants ou ayant déjà franchi la barrière du pylore (orifice de communication entre l'estomac et le duodénum), une simple surveillance suffit si aucun symptôme ne se manifeste. À l'inverse, en cas de douleur, d'une affection œsophagienne connue, de blocage intra-œsophagien, d'objet tranchant ou volumineux (longueur supérieure à 6 centimètres, diamètre supérieur à 2,5 centimètres), ainsi que d'ingestion de piles (en particulier de piles-boutons chez l'enfant) ou d'aimants, l'extraction en urgence s'impose. En effet, des lésions des muqueuses peuvent apparaître en une heure, des dégâts musculaires en deux à quatre heures et une perforation en huit à douze heures.

Prise en charge nuancée

La prise en charge sera donc nuancée et graduée. Si aucun symptôme ne se manifeste, il convient d'abord de calmer l'angoisse de l'adulte confronté au problème ou des parents dont l'enfant vient d'avaler un objet. En effet, près de 80 à 90 % des corps étrangers traversent spontanément le tractus digestif sans qu'aucune intervention endoscopique ou chirurgicale ne soit nécessaire. L'attente peut se faire même à domicile, mais une surveillance clinique et radiologique permet de vérifier que la progression se passe bien, jusqu'à l'évacuation.

Cependant, au moindre doute ou s'il y a aggravation des symptômes, par exemple en cas de douleurs, l'extraction s'impose. Elle est facilitée depuis quelques années par les progrès de l'endoscopie digestive, notamment grâce aux fibroscopes munis de pinces préemptives. Dans la pratique, seuls 15 % environ des cas exigent une extraction endoscopique. On réalise celle-ci sous anesthésie générale après intubation. Finalement, seuls 1 % des cas d'ingestion de corps étrangers nécessitent une extraction chirurgicale.

Beaucoup plus inquiétantes sont les ingestions volontaires, car elles concernent surtout des objets acérés (aiguilles, lames de rasoir, clous) ou des ustensiles de cuisine (cuillères, fourchettes, couteaux). Les sites de blocage les plus fréquents se situent au niveau de la glotte, du pharynx, de l'œsophage et du pylore. Ils nécessitent presque toujours une extraction endoscopique, voire chirurgicale.

Une autre situation à très haut risque vital est celle du *body packing*, où de jeunes adultes, en provenance de Colombie, du Pérou ou de Guyane, avalent des préservatifs remplis de stupéfiants avant de prendre l'avion pour l'Europe. En 2015, 250 kilogrammes de drogues ainsi transportés ont été découverts à l'aéroport parisien de Roissy par des policiers, qui ont ensuite patiemment attendu la livraison des « paquets ». Lorsque celle-ci ne vient pas, ou au moindre de soupçon de perforation de la poche, il devient urgent de procéder à une opération chirurgicale.

Pour finir, précisons que l'ingestion de produits ménagers liquides peut également être gravissime. Mais cela mériterait un autre article ! ■

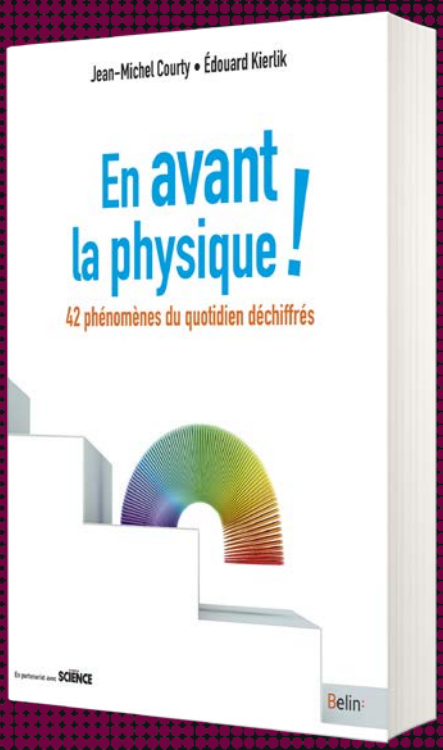
Bernard SCHMITT est chercheur au Centre d'enseignement et de recherches en nutrition du Centre hospitalier de Bretagne-Sud, à Lorient.

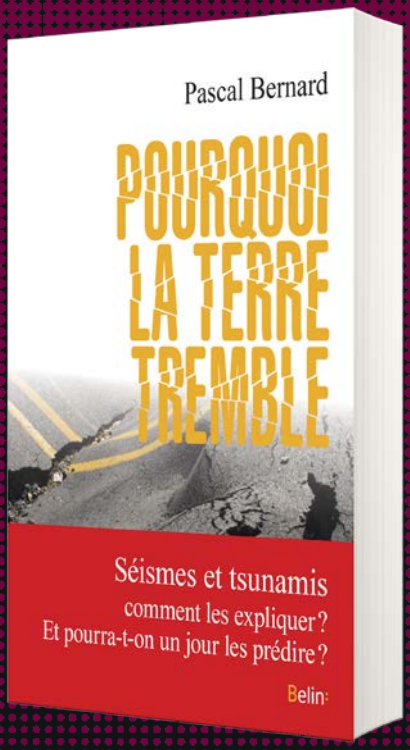
© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

Le nouvel opus de deux vulgarisateurs hors pair !

Une bouteille qui chante. Un verre de chocolat soluble qui tinte. Un carillon dont les cloches homothétiques couvrent toute la gamme. Un escalier qui joue du clairon. Une sculpture qui filtre certains sons... Et en avant la physique !

18,5 x 24,5 cm - 192 pages – 24 euros





Séismes et tsunamis, comment les expliquer ? Et pourra-t-on un jour les prédire ?

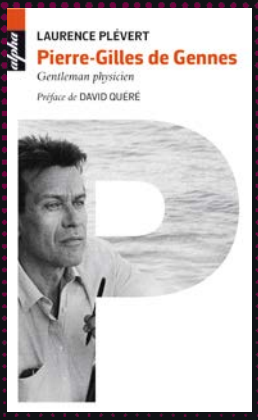
Une découverte passionnante de la lente évolution de nos connaissances sur les séismes, qui se lit comme un roman !

15 x 22 cm – 288 pages – 19,50 €

Et aussi...

Dans notre collection de livres de poche

10 x 17 cm – 304 pages – 9,90 €



10 x 17cm – 392 pages – 9,90 €

Belin ÉDITEUR

Inscrivez-vous à la newsletter sciences sur **www.belin-editeur.com**

SCIENCE & GASTRONOMIE

Le goût du fumé sans ses inconvénients

Des filtres à zéolithes permettent d'éliminer des composants toxiques de la fumée tout en préservant les arômes.

Hervé THIS

Nous disons vouloir manger sainement, mais nous faisons le contraire. Nous fumons, buvons du vin et des eaux-de-vie, nous cédons trop aux fromages, saucissons, chocolats… Et nous aimons les produits de fumaison, qui peuvent être malsains.

Pourquoi aimons-nous le goût du fumé ? Les anthropologues ont avancé que la cuisson était favorable parce qu'elle facilite la digestion, de sorte que les goûts fumés qui y sont associés auraient été sélectionnés au fil des générations.

Quoi qu'il en soit, on constate que ce goût pour le fumé est partout, des sauces des *fast food* aux saumons fumés, en passant par les saucissons, lards, etc. Certes, jadis, le fumage était un bon moyen de conserver les chairs animales (poissons, notamment), mais aujourd'hui on sait que le fumage est dangereux. Outre des composés odorants, les produits fumés contiennent des hydrocarbures polycycliques aromatiques, ou HAP, responsables notamment d'une forte prévalence de cancers de l'appareil digestif dans les pays du nord de l'Europe, où l'on mange beaucoup fumé.

Pourrions-nous avoir le fumé sans le danger ? Jane Parker et ses collègues de l'université de Reading, en Angleterre, montrent que oui (*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, DOI : 10.1021/acs.jafc.6b05399).

Présentons d'abord les faits chimiques. La combustion de la lignine du bois produit des phénols qui donnent une puissante odeur de fumé, brûlé, épicé : le paracrésol, le gaïacol, l'isoeugénol contribuent aux notes fumées épicées, tandis que des notes plus douces sont apportées par la vanilline et quelques autres composés. La plupart de ces molécules, à commencer par la vanilline, comportent un cycle « aromatique », à six atomes de carbone, car la lignine initiale est une très grosse molécule ayant un grand nombre de tels cycles. Pour la même raison, la fumée de bois contient aussi des hydrocarbures polycycliques aromatiques, où plusieurs cycles aromatiques sont associés, comme dans les benzopyrènes, qui ont cinq cycles. Ces HAP sont cancérogènes, parce qu'ils viennent notamment s'intercaler entre les paires de base de l'ADN et perturbent ainsi la réplication des cellules. Ils sont responsables des cancers du poumon des fumeurs et, chez les gros consommateurs de produits fumés, de cancers du foie.

Peut-on avoir le goût de fumé sans les HAP ? Depuis des décennies, les industriels ont cherché à composer des « arômes de fumée » en assemblant les composés les plus utiles et en évitant ceux qui sont toxiques. Parfois, ils ont condensé les aérosols de combustion dans l'eau, puis purifié les solutions obtenues. Hélas, ces purifications ne conduisent pas toujours aux produits souhaités.

Les chimistes de l'université de Reading ont préféré tester l'emploi de filtres à zéolithes (des silicates naturels), efficaces pour le tabac ou les gaz de combustion automobile. Optant pour la clinoptilolite, un aluminosilicate, ils ont produit des fumées à partir de bois de chêne et les ont divisées en deux parties, l'une traversant le filtre à zéolithes et l'autre non. Les fumées, filtrées ou non, étaient alors conduites soit vers de l'eau, soit vers de l'huile, puis ces liquides étaient analysés par chromatographie en phase gazeuse avec spectrométrie de masse.

Jane Parker et ses collègues ont montré que les zéolithes de très faible granularité étaient plus efficaces, quand elles avaient été préchauffées. Des ketchups qui avaient été additionnés d'huiles fumées, filtrées ou non, avaient des goûts comparables, avec toutefois une diminution de certaines notes associées à des composés retenus en même temps que les HAP, tels le gaïacol et ses dérivés, ou les isoeugénols. Les zéolithes les plus fines conduisaient à des goûts moins « brûlants ». Surtout, on comprend aujourd'hui que diverses zéolithes conduisent à différents arômes de fumée, de sorte que l'on saura ajuster des goûts fumés sur mesure.

Cette clinoptilolite est vendue sur Internet. Avec une cocotte-minute et de la sciure, on sort les vapeurs par la soupape de sécurité et on dirige les fumées décontaminées vers des filets de saumon qui auront été préalablement passés au sel (2 heures), puis dessalés dans l'eau (1 heure) : le fumage sain est à notre portée. Évidemment, il y a même plus simple : badigeonner des pièces de poisson ou de viande avec des arômes de fumée. ■

Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

AUSTRALIE pour l'ACPM • R.C.S. Paris B 378 899 363 - *Source : ACPM ONE 2015-2016

Où lirez-vous la presse quand les ordinateurs auront disparu ?

Sur papier, certainement, et sur d'autres supports qui n'existent pas encore.

La presse a déjà beaucoup changé. C'est même le média qui a le plus évolué.
Aujourd'hui, vous êtes 95 % à nous lire sur papier au moins une fois par mois*.
Demain, pour vous accompagner, nous évoluerons encore. Mais ce qui ne changera pas, c'est la qualité du travail de nos journalistes. C'est et cela restera notre cœur de métier. Et nous trouverons toujours le moyen de vous rendre accessible une information de qualité qui vous procure du plaisir.
Notre évolution ne se fera pas sans votre avis, exprimez-le sur **demainlapresse.com**

POUR LA SCIENCE avec #DemainLaPresse
DEMAINLAPRESSE.COM

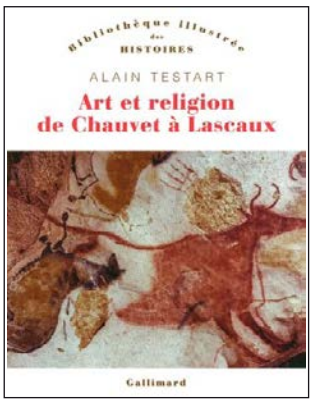
■ PALÉOANTHROPOLOGIE

Art et religion de Chauvet à Lascaux

Alain Testart

Gallimard, 2016
(380 pages, 26 euros).

La dernière grande tentative d'interprétation globale des grottes ornées de la Préhistoire remonte à plus d'un demi-siècle. Elle fut l'œuvre du préhistorien André Leroi-Gourhan, qui en proposa, dans les années 1950-1960, une lecture structuraliste maintenant abandonnée.



Pour reprendre cet énorme dossier de milliers d'images préhistoriques réalisées dans les cavernes de l'espace franco-cantabrique durant plusieurs dizaines de milliers d'années, il fallait un anthropologue de l'envergure d'Alain Testart.

Partisan d'un comparatisme ethnographique raisonné, Alain Testart a cherché à tenir compte du plus grand nombre de faits possible. Il montre dans ce livre que l'art des grottes exprime très probablement une pensée classificatoire, et que les figures s'organisent selon une série de règles simples (symétrie axiale, translation, inclusion, etc.). S'appuyant sur son excellente connaissance des sociétés aborigènes d'Australie, sans pour autant commettre l'imprudence de transposer directement leurs traditions à la Préhistoire, Alain Testart expose que le décor des grottes témoignerait d'une vision totémique du monde, utilisant les contrastes entre espèces animales pour penser les différences entre les humains.

Il tente également de présenter une théorie générale des signes non figuratifs qui abondent dans les cavernes et qui ont toujours résisté à toute interprétation. Pour cela, il s'appuie sur une analyse iconographique précise des statuettes qu'on a surnommées « Vénus » et conclut que la plupart de ces signes géométriques, hormis les plus simples (lignes et points), procéderaient d'une réduction de ces figures féminines, puis de leur inversion. Il sera très intéressant de suivre les réactions des préhistoriens à ces propositions, et l'on ne peut que regretter la disparition prématurée de l'auteur, dont on aurait aimé qu'il poursuive avec eux un fructueux dialogue.

Jean-Loïc Le Quellec
CNRS, Paris

■ HISTOIRE DE LA BOTANIQUE

Auguste de Saint-Hilaire

D. Lamy, M. Pignal, C. Sarthou, S. Romaniuc-Neto (coord.),

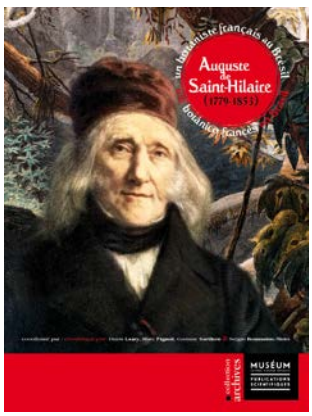
MNHN, 2016
(607 pages, 35 euros).

Ce très bel ouvrage retrace la vie et les travaux d'Auguste Prouvensal de Saint-Hilaire, botaniste et voyageur naturaliste, et les replace dans leur contexte historique et scientifique. Les auteurs traitent leur sujet en profondeur, l'accompagnent de nombreux documents d'époque, notamment la *Réponse aux reproches que les gens du monde font à l'étude de la botanique*, qu'il publia en 1811, ici rééditée et commentée.

Savant remarquable du XIXe siècle, Saint-Hilaire, à ne pas confondre avec ses contemporains les Geoffroy Saint-Hilaire du Muséum d'histoire naturelle, fut membre puis président de l'Académie des sciences. Original en ses idées, bien qu'il s'inscrive dans la lignée de l'explorateur naturaliste Alexander von Humboldt, il est reconnu tant en France qu'en Amérique du Sud pour ses travaux en botanique et ses collections d'histoire naturelle, étendues aux animaux et aux minéraux. Remarquables également sont ses récits de voyage, substantiel témoignage sur le Brésil de l'intérieur et ses habitants.

Dans ce livre sont abordées les multiples facettes de cette histoire. Elles vont d'un chapitre sur la correspondance de Saint-Hilaire à un autre traitant des recherches qu'il consacra à la flore utile et à ses usages pharmaceutiques.

On saura apprécier la transcription et le commentaire du manuscrit d'un carnet de récolte au Brésil. Ce travail vient enrichir le chapitre abordant la publication sur plusieurs années dans les *Nouvelles annales des voyages* d'observations historiques, géographiques et sur les langues indigènes. Tenu avec rigueur, cet imposant journal nous montre combien, pour son époque, Saint-Hilaire était sensible au sort des populations indigènes.



Ce riche ouvrage, issu de la collaboration d'une dizaine d'auteurs français et brésiliens, entièrement bilingue et superbement illustré, est à mettre entre toutes les mains.

Josquin Debaz
EHESS, Paris

■ SOCIOLOGIE

La Différence des sexes

N. Mathevon et E. Viennot (dir.)

Belin, 2017
(334 pages, 22 euros).

En une dizaine de contributions, le livre démonte les idées préconçues sur les différences censées opposer masculin et féminin. Chaque auteur propose une monographie précise et concrète sur sa spécialité. Comment la lutte contre les préjugés sexistes s'y exprime-t-elle ? Les attitudes ont-elles changé ? La nature des résultats scientifiques a-t-elle été modifiée ?

Bigarrées, les contributions portent sur les études cinématographiques, la biologie du comportement animal, le droit du travail, la littérature française du XVIIe siècle, la biologie du développement de l'appareil génital, la danse, la psychologie sociale, la musicologie, le sport, les études sur la Renaissance, l'éthologie des primates non humains. Selon ses goûts, le lecteur s'attarde sur tel chapitre plutôt que sur tel autre.

Par exemple, j'ai retenu que les femmes au XVIIe siècle ont beaucoup écrit, ont eu du succès ; Perrault, avec ses contes, s'inscrivait dans une mode essentiellement portée par elles. Mais leur rôle est minimisé, voire effacé, dans les histoires de la littérature, dues en général à des professeurs hommes. Un phénomène étrange semble

© Pour la Science - n° 475 - Mai 2017

fréquent : la postérité, plus sexiste dirait-on que les contemporains, oublie des femmes qui avaient été reconnues de leur vivant.

Le livre souligne le sexisme de la Révolution française. Sous l'Ancien Régime, certaines femmes avaient statutairement accès à la décision publique alors que certains hommes en étaient privés. À partir de 1789, toutes les femmes ont été privées de cet accès tandis que tous les hommes l'ont obtenu.

Le chapitre sur le comportement animal est également saisissant. Fondé sur de nombreux exemples, il montre l'extrême variabilité d'une espèce à une autre des comportements supposément typiques du mâle ou de la femelle. Prétendre que tel comportement humain est naturellement masculin ou naturellement féminin n'a donc aucun sens.

Regrettons qu'une pesante orthodoxie règne sur le livre et lui impose l'observance d'une stricte neutralité de genre. Alors, il sacrifie à la mode actuelle des contorsions. Exemple : « À lire certain.es pourfendeurs et pourfendeuses des actions positives et même une majorité d'auteurs et d'autrices... ». Je vois le mal que ce systématisme fait à la langue, pas le bien qu'il fait à l'égalité des sexes.

Didier Nordon

■ **PRÉHISTOIRE**

Notre Préhistoire

Sophie A. de Beaune et Antoine Balzeau
Belin, 2016
(208 pages, 29,90 euros).

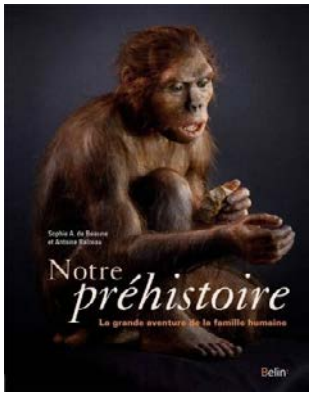
Deux grands spécialistes, l'une préhistorienne et l'autre paléoanthropologue, ont uni leurs efforts pour rééditer une œuvre de qualité, puisée directement aux sources.

La facture est d'apparence habituelle, construite comme d'autres livres qui traitent du même sujet avec des doubles pages thématiques et des encadrés pour des questions plus générales. Mais ce n'est qu'un cheval de Troie pour mieux renouveler le genre et emmener le lecteur vers d'autres horizons.

Sophie A. de Beaune a beaucoup réfléchi sur sa discipline, son histoire, ses schémas, ses dogmes et ses ambiguïtés. Cela se sent à l'angle choisi pour traiter chacun des thèmes, tels « Intelligence des chimpanzés », « Maîtrise des techniques », « Préoccupations esthétiques » et « Middle Stone Age » (« Paléolithique moyen africain »). Plutôt que de synthétiser une nouvelle fois les connaissances actuelles, elle les met en perspective, rappelle leur fragilité, sans s'embarrasser de querelles de chapelles ni d'opposition entre les écoles française, germanique et anglo-saxonne, ni reprendre les vieilles formulations. Il y a des faits, des objets, voici ce qu'on peut en dire. Point.

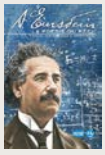
Les pages sur *Homo naledi*, sur l'Enfant de Mojokerto et sur l'homme de Florès, entre autres, portent davantage l'empreinte d'Antoine Balzeau, qui sait expliquer avec l'expérience de celui qui manipule les fossiles humains et pratique les nouvelles technologies, comme les reconstitutions en trois dimensions.

On sent que le savoir est maîtrisé et digéré. Les illustrations choisies sont originales ou rarement vues. Les auteurs ont voulu se démarquer, jusque dans les pages récapitulatives finales : un « portrait de famille » avec les dessins des principaux hominidés fossiles et une échelle chronologique simplifiée, ainsi qu'une planche bien utile résumant les « caractéristiques morphologiques » des crânes humains erectus, néandertalien et sapiens.



Je retiendrai un petit inconvénient : les cartes un peu trop anciennes, à mon sens, qui nuisent à la modernité du propos. Quoi qu'il en soit, je recommande la lecture de ce livre, accessible dès le collège, et qui servira de modèle par sa liberté de ton et son assurance tranquille, très XXIe siècle.

Romain Pigeaud
Chercheur associé à l'UMR 6566 du CNRS, université de Rennes-1



A. Einstein La Poésie du réel

M. García Iglesias et M. Kahil
21 g, 2017
(128 pages, 19 euros).

Einstein nous manque. Son pacifisme, son humanisme, son imagination, sa liberté intellectuelle... La façon dont, au milieu de la traditionaliste Suisse, puis de la rigide Prusse, il a imposé la puissance bénéfique de ces vertus envers et contre tout, particulièrement contre le nationalisme... Tous ceux que ces aspects de sa personnalité charment se feront grand plaisir en lisant cette évocation naïve du bonhomme Einstein. Cette bande dessinée idéalise un homme qui avait aussi ses travers, mais, très bien documentée, elle montre aussi l'Europe cosmopolite et civilisée qui a sombré en 1914. Einstein en est toujours resté l'un des fils valeureux.

Une mathématicienne dans cet étrange univers

Yvonne Choquet-Bruhat
Odile Jacob, 2016
(315 pages, 25,90 euros).

L'auteure aurait pu évoquer Simone de Beauvoir en intitulant son recueil de souvenirs *Mémoires d'une mathématicienne rangée*. Elle raconte ses rencontres au cours de ses pérégrinations avec les grands physiciens et mathématiciens du monde, notamment Einstein et Oppenheimer ; elle témoigne aussi sur ses maîtres à penser, Jean Leray et André Lichnerowicz. Un carnet de bal bien rempli, qui esquisse un tableau de la physique mathématique du XXe siècle, à une époque où la vie d'un chercheur compétent était encore un long fleuve tranquille.

Kosmos

Antoine Letessier Selvon
CNRS Éditions, 2017
(184 pages, 18 euros).

L'Univers est un accélérateur de particules. Cela, les physiciens l'ont découvert avant même d'être capables de construire une telle machine. Physicien des hautes énergies, l'auteur raconte comment les rayons cosmiques ont accompagné les progrès de la physique des particules, conduisant notamment à la découverte expérimentale de l'antimatière. Son récit vivant est simple et va à l'essentiel.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

ESPÉRER A = CRAINDRE NON(A)

Espérer sans craindre est impossible : si j'espère que A se réalise, je crains qu'il ne se réalise pas. Craindre sans espérer est tout aussi impossible : si je crains A, j'espère qu'il ne surviendra pas.

Donc les phrases « Tant qu'il y a de la vie, il y a de l'espoir » et « Tant qu'il y a de la vie, il y a de la crainte » ont le même sens. Mais la première, qui rassure, est souvent répétée, alors que la seconde, qui inquiète, ne s'emploie guère. Ainsi, nous nous rassurons à l'aide de formules dont nous finissons par ne plus voir la synonymie avec des formules inquiétantes.

CRÉATEURS NON RÉFLEXIFS

Selon une légende que les mathématiciens aiment cultiver, leur développement mental s'arrête à l'âge où apparaît le talent mathématique. Ce talent étant souvent précoce, leur âge mental est souvent bas. J'ai cru cette légende confirmée par le fait qu'ils sont rares à se mettre en perspective. En quoi participent-ils du mouvement général des idées ? Que s'agit-il d'éclairer ? Où est la source de leur pensée ? Peu de mathématiciens sont sensibles à ces questions.

Mais, me hasardant au loin, je suis tombé sur la remarque suivante. « Chaplin n'a pas donné beaucoup de détails sur la genèse de son personnage comique. [Son livre] *Histoire de ma vie* est décevant pour celui qui y chercherait les raisons et le sens de l'œuvre de Charles Chaplin. Sans doute les créateurs répugnent-ils à ce type d'analyse.

Il en va presque toujours de même : *Ma vie* de Richard Wagner contient peu d'indications sur la création musicale. » (Christian Godin, *Chaplin et ses doubles*, Champ Vallon, 2016, p. 41).

Pour évaluer la pertinence de ce constat, il faudrait enquêter sur tous les créateurs. Tâche colossale ! Contentons-nous d'une impression. Montaigne ou Descartes, qui décrivent leur cheminement, semblent en effet des exceptions. Beaucoup de créateurs esquivent les questions sur leur inspiration. La réponse de Beethoven, interrogé sur le sens d'une de ses sonates (« Lisez *La Tempête* de Shakespeare »), n'éclaire pas plus le processus créatif que celle de Newton à qui on demandait comment il avait trouvé sa loi (« En y pensant toujours »). Les créateurs, dirait-on, évitent d'explorer de trop près ce qui se passe en eux, comme s'ils craignaient que cela ne tarisse la source de leur inspiration.

Finalement, il se peut que les mathématiciens soient dans le lot commun. Tels que je les connais, je doute qu'ils se sentent flattés par cette conclusion.

PLURIEL ET PLURALITÉ DU SIGLE

Savoir quel domaine de recherche se cache sous le sigle français STS est simple : il n'y a qu'à remplacer ces initiales par les noms qu'elles désignent. Minute ! L'opération est plus délicate qu'on ne croirait.

Le sigle peut signifier « Science, technique, société ». Ou « Sciences, techniques, sociétés ». Ou même « Sciences, techniques et société ». Ce curieux parti, retenu par Wikipédia jusqu'en mars dernier, semble estimer la pluralité des sciences et des techniques mieux attestée, ou plus signifiante, que la pluralité des sociétés. Selon qu'on ne met aucun *s*, qu'on en met trois, qu'on en répartit un ou deux à la fin des trois termes, huit interprétations différentes – et rivales – du sigle STS sont admissibles. Ainsi, l'intitulé « Science, technique, société » est abstrait. Il est assez loin des sciences, des techniques et des sociétés pour les percevoir comme des unités : démarche de théoricien, qui s'appuie sur la déduction plus que sur l'observation. À l'inverse, l'intitulé « Sciences, techniques, sociétés » fleure ses études de cas. Des sociologues, des ethnologues décrivent avec minutie l'interaction de tel développement scientifique ou technique avec telle société.

Peut-être est-il avisé de garder STS sans expliciter. Que chacun comprenne à sa façon et croie que les autres comprennent comme lui. Mieux vaut l'ambiguïté que les querelles d'école.

RAISON ET POUVOIR

Questions et objections à la fin d'une conférence. L'orateur interpellé commence chacune de ses réponses par : « Vous avez raison. » Suite à quoi, il se met à argumenter contre l'objection qui lui a été faite. Sous une apparence pacificatrice, la formule « Vous avez raison » laisse à l'orateur du temps pour mûrir une riposte.

Ce procédé est plus fréquent chez les littéraires ou philosophes que chez les scientifiques. Ces derniers réfléchiraient-ils plus vite ? Sans doute pas. Mais ils ont moins peur du silence. La remarque faite à l'orateur demande examen ? Eh bien, il se tait ou marmonne dans sa barbe tout en réfléchissant. S'il trouve que son contradicteur a raison, il se range à sa position.

Occuper sans faiblir l'espace sonore est une façon d'asseoir son pouvoir plus prisée des littéraires que des scientifiques... ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mai 2017 – N° d'édition M0770475-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 217303 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

citavi

Organiser la connaissance.

Vous souhaitez construire une base bibliographique collaborative, découvrez la référence:

Pilotez une base de références et d'articles, commune à votre équipe

Partagez la base sur un serveur en local, gage de sécurité maximale

Consignez citations et idées, annotez des PDF à plusieurs

Planifiez des tâches, notamment partagées

Citavi parle français – et six autres langues.

Citavi vous facilite la vie

mais avant tout vos écrits scientifiques.

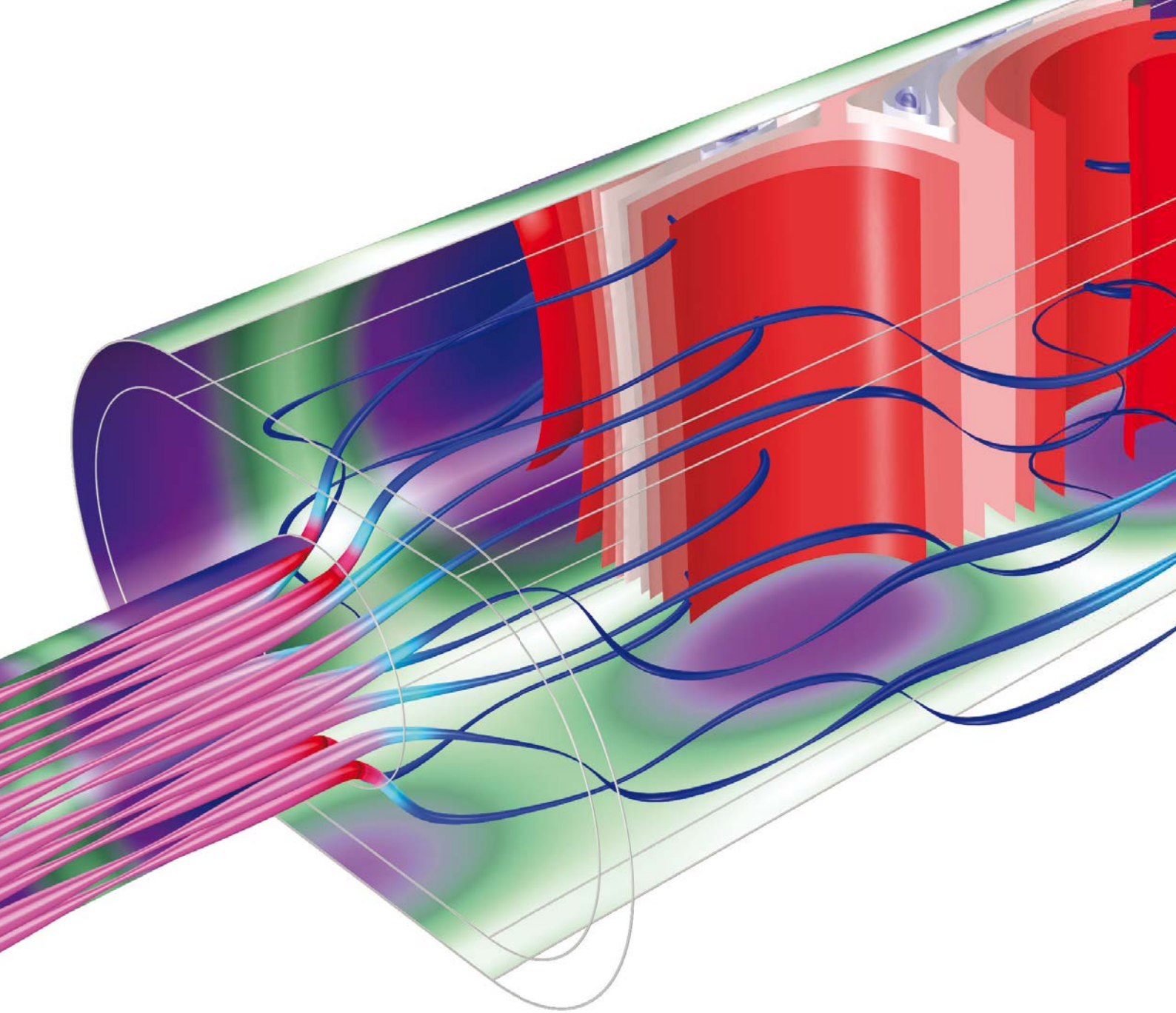
ritme.com/citavi

Tél. +33 (0)1 42 46 00 42

Solution distribuée France, Suisse, Belgique et Luxembourg

RITME SCIENTIFIC SOLUTIONS

© 2017 RITME. Citavi est une marque déposée de Citavi. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

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

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

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

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.
comsol.fr/products

© Copyright 2017 COMSOL. COMSOL, the COMSOL logo, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks.

COMSOL