NEUROMÉDECINE
La moelle épinière bientôt réparable

MATHÉMATIQUES
Des formules pour mesurer la beauté

INTERDISCIPLINARITÉ
Collège : la réforme va dans le bon sens

POUR LA SCIENCE

Septembre 2015 - n° 455

Édition française de Scientific American

À la recherche des états extrêmes de la matière

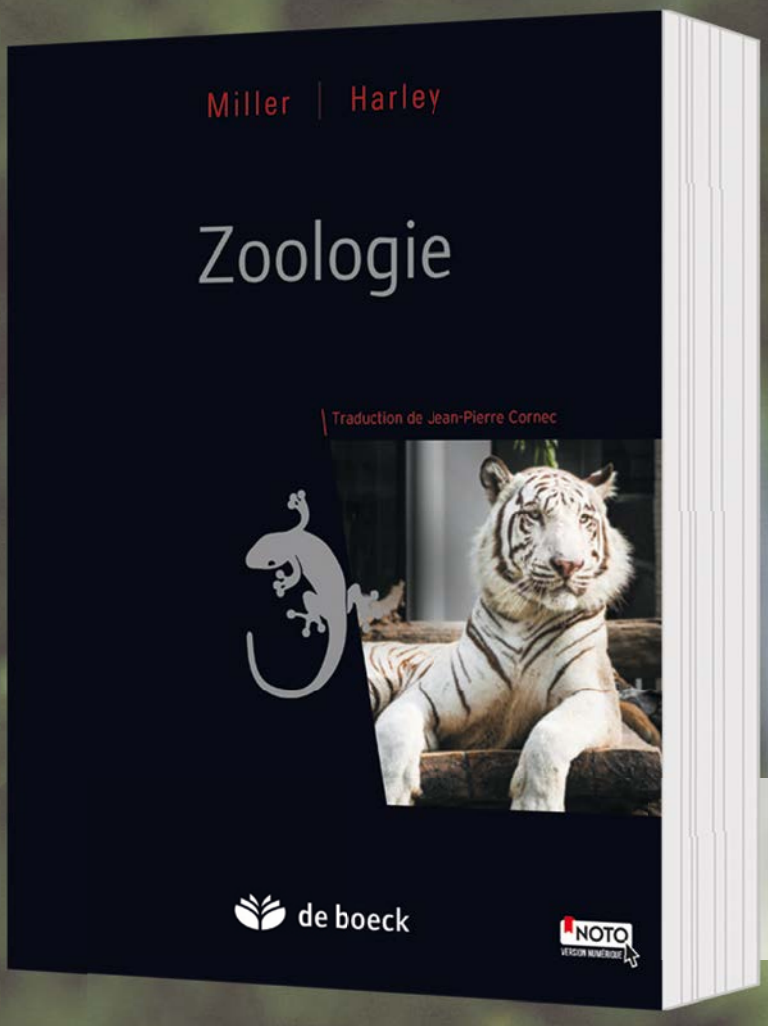
GLUONS
La colle des particules

M 02687 - 455 - F: 6,50 € - RD

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

DÉCOUVREZ *ZOOLOGIE*

UN OUVRAGE FONDAMENTAL POUR L'ÉTUDE DU MONDE ANIMAL



Le règne animal envisagé sous ses aspects morpho-anatomo-fonctionnels et évolutifs, replacé dans le contexte d'un écosystème fragilisé par l'action de l'homme.

Ce livre est disponible sur **NOTO**, notre plateforme d'ouvrages interactifs.

Pour en savoir plus :
www.noto.deboecksuperieur.com

John P. Harley & Stephen A. Miller
Traduction de Jean-Pierre Cornec
1re édition • Juin 2015 • 640 p.
• 72 € • 978-2-8041-8816-0

- Une **vision détaillée** du règne animal
- Des **aperçus évolutifs** qui complètent les données purement structurales
- Une **approche phylogénétique** qui se base sur la ressemblance par filiation, l'héritage à partir d'ancêtres communs
- Une **démarche écologique** nuancée et sensibilisante
- Des **illustrations abondantes** et diversifiées avec un cladogramme à chaque chapitre

En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

de boeck supérieur

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

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, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté de Dylan Beiner (stagiaire)
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Ingrid Leroy, Nathalie Ravier (stagiaire)
Correction et assistance administrative : Maud Bruguière
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet, assistées de Héloïse Clément (stagiaire)
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
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 : François Arleo, Yves Dessaux, Denis Faure, Eitan Haddok, Christophe Pichon, Jean-Claude Rage, Stéphen Rostain, Francesca Sargolini

PUBLICITÉ France
Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04
Abonnement en ligne : **http://www.pourlascience.fr**
Courriel : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil
DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr
Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. 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. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© **Pour la Science S.A.R.L.** Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2014 www.ojd.com

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Un monde coloré et cependant obscur

Depuis les années 1970, on sait que le proton et le neutron, les constituants du noyau de l'atome, ne sont pas des particules élémentaires, mais des assemblages de trois « quarks » solidement collés par des « gluons ». Ces derniers véhiculent l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales de la nature, qui assure la cohésion du proton et du neutron, mais aussi du noyau atomique.

Plus largement, l'univers des quarks et des gluons fait l'objet d'une théorie cohérente et mathématisée, la chromodynamique quantique – QCD pour les intimes –, qui est l'une des colonnes maîtresses du modèle standard de la physique des particules. Pourquoi « chromo » ? Tout simplement parce que les physiciens ont dénommé « couleur » une propriété mathématique clef attachée aux quarks et aux gluons.

Des énigmes liées à des difficultés techniques ou à des failles dans la théorie ?

La chromodynamique quantique décrit ainsi un monde « coloré ». La conception de cette théorie a été un tour de force. L'analyse et la résolution de ses équations en est un autre, qui reste inachevé. De fait, certains pans de la physique de l'interaction forte sont encore mal compris. Par exemple, on ne sait pas retrouver toutes les propriétés du proton et du neutron à partir de celles de leurs constituants ; on ignore si certains états exotiques constitués uniquement de gluons existent ; ou encore, on ne sait pas bien expliquer pourquoi les particules observables sont nécessairement incolores. Pour autant, le domaine a connu plusieurs avancées récentes *(voir pages 26 à 37)*.

Les énigmes actuelles de la QCD résultent-elles seulement d'obstacles mathématiques ? C'est probable. Mais l'histoire des sciences a montré que le diable se cache parfois dans les détails : peut-être la résolution des problèmes résiduels nécessitera-t-elle de nouvelles idées, dont émergera une théorie encore meilleure. ■

sommaire

3 Édito

Actualités

6 Rendez-vous historique avec Pluton

7 Des milliards d'euros qui partent en fumées

9 La vraie tombe de Philippe II de Macédoine identifiée

10 Des neurones de vitesse complètent le GPS cérébral

12 La plante choisit ses bactéries

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Point de vue
Réforme du collège : l'interdisciplinarité est une bonne chose
Ange Ansour et François Taddei

16 Entretien
« Le patrimoine astronomique français est en danger »
Emmanuel Pécontal

20 Lu sur SciLogs.fr
Les réseaux et le refus de la vaccination
Fabienne Hild

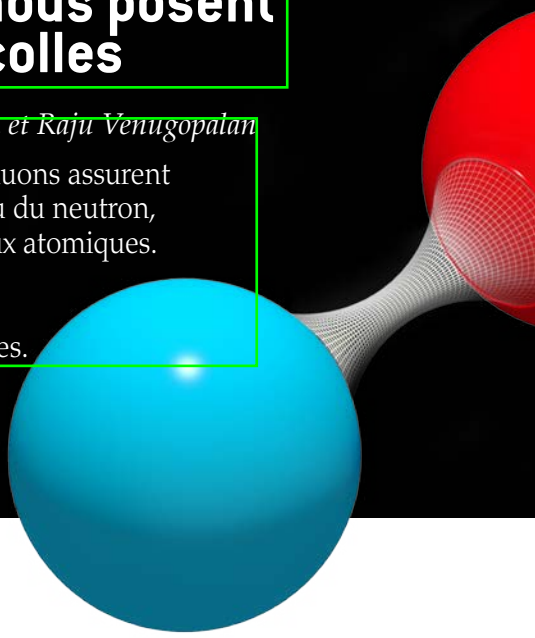
22 Homo sapiens informaticus
L'informatique, l'écolier et l'hôtelier
Gilles Dowek

24 Cabinet de curiosités sociologiques
La souris et l'effet papillon
Gérald Bronner

47 Cahier spécial
Nos docteurs ont plus d'un talent !
En partenariat avec UNIVERSITÉ SORBONNE PARIS CITÉ

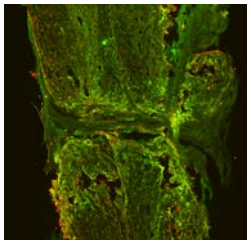
À LA UNE

26 PHYSIQUE DES PARTICULES
Les gluons nous posent encore des colles
Rolf Ent, Thomas Ullrich et Raju Venugopalan
En liant les quarks, les gluons assurent la cohésion du proton ou du neutron, ainsi que celle des noyaux atomiques. Par quels mécanismes ? Les physiciens n'ont pas encore toutes les réponses.



36 PHYSIQUE DES PARTICULES
« Le plasma quarks-gluons se comporte comme un fluide parfait »
Entretien avec François Gelis
Au moyen de collisions à haute énergie entre noyaux atomiques, les physiciens créent un « plasma quarks-gluons ». Ils étudient les propriétés de cet état de la matière qui s'est aussi formé dans les premiers instants de l'Univers.

38 MÉDECINE
Vers la reconstruction de la moelle épinière
Alain Privat et Florence Perrin
La rééducation n'est plus l'unique horizon des personnes paralysées. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi une moelle épinière lésée ne se répare pas spontanément et l'on sait mieux comment favoriser sa régénération.



© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

56 IMAGERIE

Day Night Band, le veilleur de nuit

Steven Miller

Un satellite américain d'observation lancé en 2011 embarque un capteur d'une sensibilité inédite à la lumière du domaine visible. Ses données recueillies la nuit ouvrent de nouveaux horizons aux météorologistes, aux pompiers, aux services de secours et aux scientifiques.

60 PALÉONTOLOGIE

Aux origines de nos mâchoires

Vincent Dupret

L'examen aux rayons X d'un fossile de petit poisson cuirassé vieux de 415 millions d'années éclaire l'apparition des premiers animaux vertébrés dotés de mâchoires.

68 HISTOIRE DES SCIENCES

Mesmer ou la chute du magnétiseur

Bruno Belhoste

En 1784, deux commissions officielles condamnent la doctrine de Mesmer, qui triomphe à Paris en « magnétisant » des malades. Sur fond de déclin de l'absolutisme politique et de naissance des sciences expérimentales, l'affaire cristallise les passions…

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Rendez-vous

78 Logique & calcul

La beauté mise en formules

Jean-Paul Delahaye

Entamée en 1933 par le mathématicien George Birkhoff, la recherche de mesures scientifiques du beau se poursuit, avec des moyens théoriques et pratiques renouvelés.

84 Science & fiction

Jabba le Hutt, une limace de l'espace ?

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science

Promenades dans un paysage de lumière

Loïc Mangin

89 Idées de physique

Comme un oiseau… sur un câble électrique

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts

Qu'arriverait-il sans combinaison dans l'espace ?

Roland Lehoucq

94 Science & gastronomie

La cerise dans le gâteau

Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et posé sur toute la diffusion abonné. Des offres d'abonnement exceptionnelles sont proposées également en pages 21, 76 et 77. En couverture : © concept w/shutterstock.com

POUR LA SCIENCE.fr LETTRE D'INFORMATION

Ne manquez pas la parution de votre magazine avec la NEWSLETTER

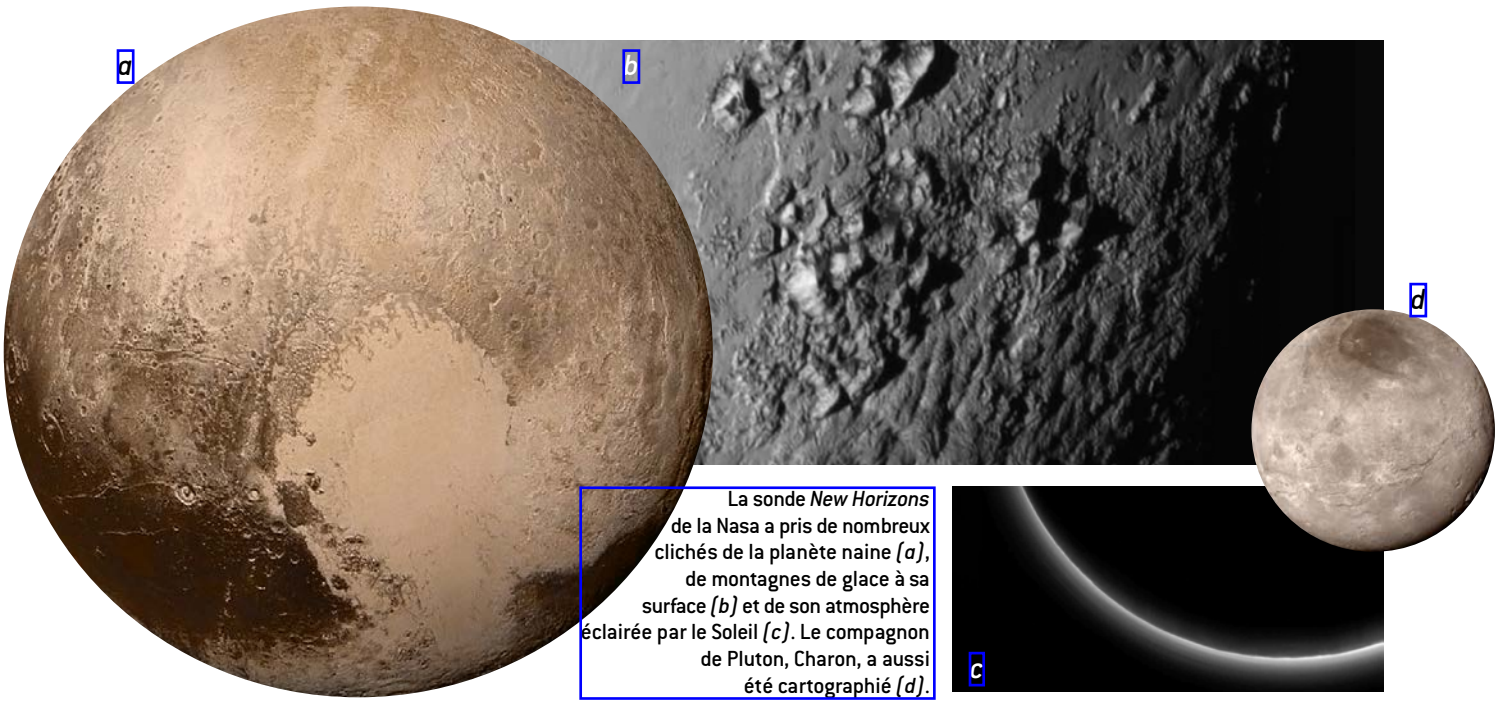
- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Planétologie

Rendez-vous historique avec Pluton

Pour la première fois, une sonde spatiale, New Horizons, *a survolé Pluton. L'occasion de découvrir de près cette planète naine située aux confins du Système solaire.*



La sonde *New Horizons* de la Nasa a pris de nombreux clichés de la planète naine *(a)*, de montagnes de glace à sa surface *(b)* et de son atmosphère éclairée par le Soleil *(c)*. Le compagnon de Pluton, Charon, a aussi été cartographié *(d)*.

Depuis sa découverte par l'Américain Clyde Tombaugh en 1930, la planète naine Pluton n'avait livré que peu de ses secrets. Les télescopes au sol et le télescope spatial *Hubble* avaient révélé l'existence d'un compagnon, Charon, et de quatre satellites (Styx, Nyx, Kerberos et Hydra). Mais qu'en est-il de la géologie de Pluton, de sa composition, de son atmosphère ? Pour le savoir, la Nasa a lancé la sonde *New Horizons* qui, après un voyage de dix ans, a frôlé la planète naine le 14 juillet 2015, une date historique dans l'exploration du Système solaire.

Pluton a longtemps été considérée comme la neuvième planète du Système solaire, mais sa petite taille posait problème. Avec Éris, un autre objet lointain, elle est représentative d'une population de petits corps qui se trouvent au-delà de l'orbite de Neptune. Il a donc été décidé en 2006 de rétrograder Pluton dans la catégorie des planètes naines. Cela n'en reste pas moins un objet d'un grand intérêt pour comprendre la formation et l'évolution des planètes naines, ainsi que l'histoire du Système solaire.

Après son passage à seulement 11 095 kilomètres de Pluton, la sonde *New Horizons* a livré ses premières images détaillées de la surface de la planète naine. Elle a notamment survolé le bord de la région en forme de cœur *(cliché a)*, révélée lors de son approche et nommée depuis « région Tombaugh » en l'honneur du découvreur de Pluton. Les clichés montrent la présence de montagnes qui culminent à près de 3500 mètres *(b)* ! De quoi sont-elles constituées et comment se sont-elles formées ?

La surface de Pluton est couverte de glaces de méthane et d'azote, matériaux qui ne sont pas assez solides pour produire des montagnes aussi hautes. Il s'agit peut-être de glaces d'eau, qui deviennent résistantes comme de la roche aux très basses températures plutoniennes (vers – 220 °C).

Quelle activité géologique expliquerait la formation des montagnes ? Le Système solaire abrite d'autres mondes de glace ayant une activité géologique : Encelade et Europe, satellites de Saturne et de Jupiter respectivement. L'énergie à l'origine de leur activité provient des forces de marée exercées par la planète géante autour de laquelle gravitent ces lunes. Mais ce n'est pas le cas de Pluton, qui ne dépend d'aucune planète plus massive. De nouveaux mécanismes sont donc à imaginer pour comprendre l'origine des montagnes de Pluton.

Autre caractéristique frappante des images prises par *New Horizons* : la surface de Pluton présente peu de cratères d'impact. Or les petits corps dépourvus d'atmosphère assez épaisse, comme la Lune, subissent un bombardement météoritique continu qui provoque la formation de nouveaux cratères. Le faible nombre de cratères, en particulier sur la région Tombaugh, signifie que l'activité géologique y est récente, voire encore en cours. D'après les estimations, les montagnes plutoniennes seraient âgées d'à peine 100 millions d'années. L'une des surfaces les plus jeunes jamais observées dans le Système solaire !

© NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute

Une heure après le passage de la sonde au plus près de Pluton, une image de la planète occultant le Soleil a été prise. On voit ainsi son atmosphère, éclairée par l'étoile *(c)*. Elle s'étend jusqu'à 130 kilomètres d'altitude. La couche au-dessus de 80 kilomètres est plus diffuse et composée de méthane. Exposées au rayonnement ultraviolet du Soleil, ses molécules se combinent pour former de l'éthylène et de l'acétylène qui migrent dans la partie basse de l'atmosphère. Ces composés organiques, sous l'action de la lumière, forment alors des molécules diverses nommées tholins, qui se déposent sur le sol et lui donnent sa couleur sépia.

Les compagnons de Pluton sont aussi à l'honneur sur les images de *New Horizons*. Un cliché de Charon *(d)*, corps de 1 200 kilomètres de diamètre, révèle des structures impressionnantes et variées : un canyon profond de 7 à 9 kilomètres et des falaises s'étirant sur 1 000 kilomètres, qui seraient le résultat d'une activité géologique interne. La tache sombre visible au pôle Nord, baptisée Mordor en référence au *Seigneur des anneaux*, serait un mince dépôt noir encore non identifié. Comme Pluton, Charon semble relativement pauvre en cratères d'impact, probablement effacés par une activité géologique encore importante.

New Horizons est loin d'avoir transmis toutes les données recueillies lors de son bref survol de Pluton : elles sont envoyées vers la Terre au rythme de 2 000 bits par seconde, et il faudra 16 mois pour toutes les réceptionner ! Les astronomes sont impatients de pouvoir les éplucher pour y trouver des réponses à leurs questions… et de nouvelles énigmes.

Sean Bailly

Site de la mission : http://pluto.jhuapl.edu/

Science et société

Des milliards d'euros qui partent en fumées

Plusieurs dizaines de milliards d'euros : c'est le coût associé à la pollution de l'air en France, selon un bilan dressé par une commission d'enquête du Sénat et rendu public le 15 juillet. Olivier Chanel, économiste de l'environnement à l'AMSE-GREQAM, à Marseille, nous décrit les divers impacts des polluants et la façon dont on calcule leur coût.

Quels sont les principaux polluants et leurs sources ?

Olivier Chanel : Nous vivons dans un cocktail de multiples polluants : oxydes d'azote, particules fines, ozone, ammoniac, oxydes de soufre… Les pollueurs varient selon le composé et la zone géographique. Les oxydes d'azote sont principalement émis par les transports, l'ammoniac par l'agriculture, les oxydes de soufre par l'industrie… Quant aux particules fines, les principales sources sont les transports en zone urbaine, mais l'industrie et les chauffages individuels sur le reste du territoire.

Quels effets néfastes ont ces polluants ?

O. C. : Principalement des effets sanitaires. La pollution de l'air augmente par exemple le risque de cancer du poumon, d'accident cardiovasculaire et de crise d'asthme. Cela réduit l'espérance de vie de quelques mois en moyenne en France. Avec de grandes disparités : chacun est plus ou moins sensible et les citadins sont particulièrement exposés. À Marseille, la plus touchée des grandes villes, la baisse de l'espérance de vie atteint 7,5 mois par habitant en moyenne.

Il existe également des effets non sanitaires. Les polluants, parfois toxiques pour les plantes, entraînent une baisse des rendements agricoles et forestiers, et dégradent les bâtiments.

Comment quantifie-t-on les effets sanitaires ?

O. C. : On mesure à la fois les émissions polluantes à un endroit particulier et certains indicateurs de santé, tels que le nombre de cas de cancer du poumon dans la population habitant ou travaillant à proximité de cet endroit. Des traitements statistiques permettent ensuite d'éliminer les autres causes potentielles et d'attribuer les troubles aux polluants.

Reste alors à évaluer leur coût. Pour les maladies,

Olivier Chanel est directeur de recherche au CNRS.

l'une des méthodes consiste à compter le nombre de jours d'arrêts de travail ou d'hospitalisation, et à multiplier par les salaires et les frais de santé. Pour les décès prématurés, c'est plus compliqué. Depuis une trentaine d'années, on utilise des méthodes dites de préférences déclarées, où l'on demande aux gens combien ils seraient prêts à payer pour réduire leur probabilité de mourir. On estime ainsi la valeur d'une année de vie perdue entre 30 000 et 80 000 euros.

Comment les coûts se répartissent-ils ?

O. C. : Environ 80 % du coût de la pollution atmosphérique est lié à la surmortalité. L'augmentation des pathologies représente 5 à 10 %, comme les effets non sanitaires. Au total, on obtient plusieurs dizaines de milliards d'euros pour l'impact sanitaire et quelques milliards pour les autres effets.

Le rapport du Sénat propose-t-il des solutions ?

O. C. : Oui, il préconise toute une série de mesures. La plupart visent à diffuser les bonnes pratiques (nettoyage des équipements, cycles de combustion optimisés, etc.) ou à favoriser la recherche et l'innovation. L'instauration d'une fiscalité écologique est aussi conseillée, par exemple pour développer les véhicules électriques.

Un levier important, et insuffisamment traité dans le rapport à mon sens (une seule mesure), serait de réduire les transports individuels. Plusieurs pistes existent, telles qu'un meilleur maillage du territoire par les transports publics. Si l'on diminue le nombre de véhicules, on fait baisser non seulement la pollution, mais aussi les nuisances associées, tels le bruit ou les émissions de gaz à effet de serre.

Guillaume Jacquemont

Pollution de l'air : le coût de l'inaction, rapport n° 610, 2015 (www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-11.pdf)

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Une cousine de la Terre

L'exoplanète Kepler-452b, découverte en juillet, se distingue de la Terre par peu de choses. Elle est située dans la zone habitable – la région autour de l'étoile où l'eau est susceptible d'être liquide. Et contrairement aux autres planètes connues dans cette zone, Kepler-452b est en orbite autour d'une étoile similaire au Soleil. La durée de sa révolution est de 385 jours. La différence la plus marquée est sa taille : un diamètre 60 % plus important que celui de la Terre. La composition rocheuse de cette super-Terre reste à confirmer.

Captivantes diatomées

Dans l'océan, les diatomées sont parmi les membres les plus efficaces du phytoplancton pour fixer le dioxyde de carbone par photosynthèse : ces organismes unicellulaires contribuent autant à la production de matière organique planétaire que les forêts tropicales. Benjamin Bailleul, de l'université de Liège, et ses collègues ont compris pourquoi. Chez les diatomées, des échanges énergétiques soutenus se produisent entre les chloroplastes, sièges de la photosynthèse, et les mitochondries, sièges de la respiration, ce qui, en ajustant l'énergie fournie aux chloroplastes, optimise la photosynthèse.

Percées de pulsar

Le système binaire B1259 contient un pulsar – une étoile à neutrons en rotation rapide – et une étoile 30 fois plus massive que le Soleil, également en rotation rapide sur elle-même. Cette dernière expulse de la matière qui forme un disque autour d'elle. Grâce à l'observatoire spatial *Chandra*, George Pavlov, de l'université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues ont observé que le pulsar perce le disque et en disperse la matière lors de chacun de ses passages au plus près de l'étoile, tous les 41 mois.

Biophysique

Quand l'hippocampe inspire la robotique

© Lyeland/shutterstock.com

Les os de la queue de l'hippocampe forment des plaques carrées articulées.

Chez les différentes espèces animales, la queue est généralement cylindrique. Pas celle de l'hippocampe, qui est constituée d'une succession de segments osseux carrés. Ces derniers sont formés de quatre plaques en forme de L reliées par des joints offrant une grande flexibilité. Quel avantage cette structure confère-t-elle à l'hippocampe ?

Michael Porter, de l'université de Clemson aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé une imprimante 3D pour reproduire deux structures : une carrée s'inspirant de la queue de l'hippocampe, et une circulaire. Ces prototypes ont ensuite été soumis à différentes contraintes : torsion, pliage, compression et écrasement.

Il faut fournir plus d'énergie (environ dix fois plus) pour casser la structure carrée que pour briser la circulaire. Cette résistance confère sans doute à l'hippocampe une meilleure protection face aux prédateurs. De plus, comme la surface de contact des plaques carrées est plus grande que celle des plaques rondes, l'hippocampe saisit des objets plus aisément et avec un meilleur contrôle.

Cette étude pourrait aider les ingénieurs à créer de nouveaux dispositifs robotiques. L'une des idées est, par exemple, d'imiter la structure de l'hippocampe pour construire un solide bras automatisé capable d'intervenir dans des environnements hostiles.

Dylan Beiner

M. M. Porter et al., Science, vol. 349, n° 6243, 2015

Insolite

Le robot qui saute sur l'eau

Décidément, la nature est une bonne source d'inspiration pour la robotique. Dans la catégorie « marcher sur l'eau », les gerris, des punaises d'eau, sont imbattables. Ces insectes profitent de la tension superficielle de l'eau, qui fait de sa surface une sorte de peau sur laquelle ils évoluent. Des robots se déplaçant sur l'eau existent depuis une dizaine d'années, mais plus difficile à reproduire était le saut du gerris : l'insecte est capable de créer une poussée verticale sans percer la surface du liquide, évitant ainsi le risque de noyade. Je-Sung Koh, de l'université nationale de Séoul, et ses collègues ont montré que pour ce faire, les pattes de l'insecte effectuent un mouvement de rotation, que leur robot sauteur *(ci-dessous)* reproduit parfaitement.

© Université nationale de Séoul

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Archéologie

La vraie tombe de Philippe II de Macédoine identifiée

La « Tombe de Philippe » de la nécropole royale d'Aigéai, la première capitale macédonienne, était censée être celle de Philippe II, le père d'Alexandre le Grand. Mais une tombe voisine, où est inhumé un personnage boiteux, est probablement la véritable sépulture du monarque.

Juan Luis Arsuaga, de l'université de Madrid, et son équipe viennent d'aligner une série d'indices suggérant que les restes de Philippe II de Macédoine (–382 à –336) se trouvaient dans la tombe royale I d'Aigéai plutôt que dans la tombe II.

Aigéai, près de Vergina au nord de la Grèce actuelle, était la première capitale du royaume de Macédoine. Découverte intacte en 1977, la tombe II est une tombe à incinération qui contenait un riche mobilier funéraire. Plusieurs indices suggèrent qu'il pourrait s'agir de la tombe de l'un des fils de Philippe II, mais « l'establishment archéologique s'acharne à maintenir qu'il s'agit de celle de Philippe II », souligne Juan-Luis Arsuaga.

Pour sa part, la tombe I est une tombe à inhumation qui contenait les squelettes d'un homme, d'une femme et d'un bébé. Plus ancienne que la tombe II, elle est flanquée d'un autel dédié au culte d'un héros. Elle se distingue aussi par ses magnifiques peintures. L'étude de l'usure des dents de l'homme défunt suggère qu'il est décédé vers l'âge de 45 ans ; celle des dents de la jeune femme suggère un décès à 18 ans ; quant au bébé, ses os longs indiquent une mort vers 10 ou 11 mois.

Or ces âges correspondent au récit historique relatif au monarque, père d'Alexandre le Grand. Philippe II a en effet presque 46 ans quand il est assassiné. On soupçonne qu'Olympias, sa quatrième épouse, a trempé dans ce meurtre qui ouvre le chemin du trône à son fils Alexandre. Quoi qu'il en soit, aussitôt après l'assassinat, Olympias vient tuer « sur les genoux de sa mère » le bébé de la septième épouse Cléopâtre, qu'elle oblige ensuite à se pendre.

Toutefois, ce sont surtout les lésions osseuses du genou gauche de l'homme qui convainquent les chercheurs espagnols qu'ils ont bien affaire à Philippe II. D'après son opposant Démosthène (–384 à –322), quelques années avant sa mort, le roi est blessé « à la jambe » au cours d'une bataille, et il en aurait gardé une forte boiterie. Or les chercheurs ont constaté que le genou gauche de l'homme de la tombe I était figé par une ankylose – une prolifération de tissu, qui, selon les chercheurs, s'est produite pendant l'inflammation due à une agression de l'articulation et non pas à une maladie. En outre, le tibia et le fémur sont fusionnés autour d'un trou rond de la taille d'une pointe de lance.

D'après les chercheurs, l'irruption de cette pointe dans l'articulation a violemment séparé le tibia du fémur. Malgré cela, les médecins du roi ont longtemps évité de retirer l'arme afin d'éviter une hémorragie mortelle. La prolifération qui s'est enclenchée a donc soudé les os de part et d'autre de la pointe. Ce n'est que quand la cicatrisation a été assez avancée que les médecins du roi ont osé retirer la pointe, ce qui a laissé un trou béant au milieu d'une articulation désormais figée.

Pour les chercheurs, la présence dans la tombe de trois défunts d'âges correspondant aux âges historiques de Philippe II, de Cléopâtre et de leur bébé, la blessure handicapante de l'un d'eux au genou, la présence d'un autel dédié à un grand héros, l'ornementation somptueuse de la tombe et son antériorité ne s'expliquent que si la tombe I est bien celle du père d'Alexandre le Grand.

François Savatier

PNAS, en ligne le 22 juillet 2015

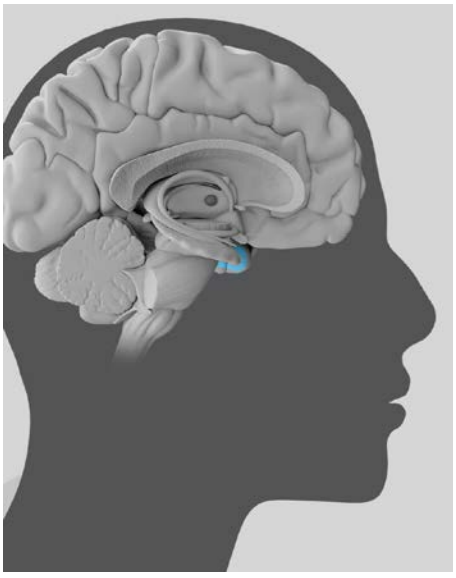
Cette fresque *(ci-dessus)* de grande qualité retrouvée dans la tombe I d'Aigéai représente le rapt de Perséphone, la future reine des morts, par le dieu des enfers Hadès, thème attendu dans un contexte funéraire. Des clichés de la jambe endommagée du présumé Philippe II révèlent le passage de la lance que le roi reçut dans le genou lors d'une bataille *(ci-dessous)*.

Neurobiologie

Des neurones de vitesse complètent le GPS cérébral

Dans la lignée de ses travaux sur la représentation mentale de l'espace, l'équipe des prix Nobel May-Britt et Edvard Moser a découvert des neurones qui traduisent la vitesse de déplacement.

© Shutterstock.com/Yanlev Ivan



© 2014 The Nobel Comm Titee/Mattias Karlen

Des neurones situés dans le cortex entorhinal *(à droite, en bleu)* s'allument d'autant plus vite que la vitesse de déplacement est grande.

15 %

des neurones

du cortex entorhinal médian sont des « neurones de vitesse ».

Depuis les années 1970, plusieurs travaux ont révélé la façon dont nous dressons une carte mentale de l'environnement. Certains ont d'ailleurs été récompensés par le prix Nobel de médecine et de physiologie 2014, tels ceux des époux May-Britt et Edvard Moser, de l'Université norvégienne de sciences et technologie. L'équipe de ces deux chercheurs vient de découvrir chez les rats une nouvelle pièce du GPS cérébral : des neurones indiquant la vitesse de déplacement.

Notre système de navigation interne repose sur plusieurs régions de l'encéphale, parmi lesquelles le cortex entorhinal médian. Dans ce dernier, certains neurones traduisent la position de la tête, d'autres la présence éventuelle d'un « bord » (un mur, un précipice, etc.) et d'autres encore créent un maillage spatial virtuel : chacun de ces neurones, nommés cellules de grille, s'allume quand l'animal passe par, ou pense à, divers points de l'environnement, points qui dessinent une grille hexagonale.

Si la représentation mentale de l'espace commençait donc à être bien comprise, le signal de vitesse permettant une navigation dynamique au sein de cette représentation était plus obscur. Les chercheurs l'ont traqué dans le cortex entorhinal médian. Pour ce faire, ils ont mesuré l'activité de neurones individuels grâce à des microélectrodes implantées dans le cerveau des rats, pendant que ces derniers se déplaçaient. Au total, plusieurs milliers de neurones ont été suivis à la loupe.

Les chercheurs ont trouvé qu'environ 15 % des neurones du cortex entorhinal médian sont des « neurones de vitesse » : ils émettent des impulsions à un rythme proportionnel à la vitesse de déplacement de l'animal (mesurée par ailleurs). En d'autres termes, leur fréquence d'allumage est d'autant plus haute que la vitesse est élevée, et ce quels que soient l'environnement et le sens du déplacement.

Comment des informations sur la vitesse parviennent-elles à ces neurones ? Apparemment pas *via* des signaux visuels – tels que le défilement des objets –, car les neurones de vitesse s'activaient de la même façon dans le noir. Les chercheurs supposent donc que ces informations viennent en partie des signaux neuraux de type proprioceptif ou moteur, issus des muscles et des articulations.

Restait à déterminer comment la vitesse est intégrée au GPS cérébral. Par une analyse de l'activité des neurones de vitesse et des neurones de grille, les chercheurs ont montré que l'allumage des premiers influe sur celui des seconds. Mieux : plus la vitesse (et donc la fréquence d'activation des neurones de vitesse) est grande, plus les neurones de grille s'allument en avance sur le passage réel au point de la grille. Le signal de vitesse sert donc au cerveau à anticiper en permanence les positions atteintes l'instant d'après et ainsi à se représenter mentalement les déplacements dans l'espace.

G. J.

E. Kropff et al., Nature, en ligne le 15 juillet 2015

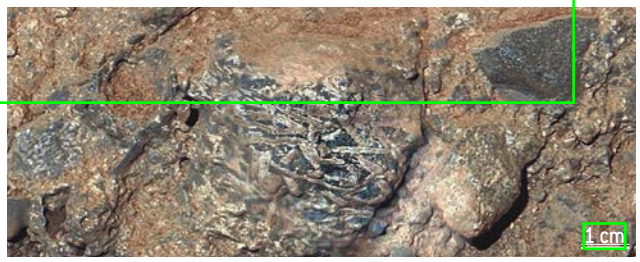
© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Géosciences

Curiosity : de la croûte continentale sur Mars

La géologie martienne serait bien plus proche de celle de la Terre qu'on ne le pensait. Dans la croûte terrestre, on distingue la croûte océanique, dense et constituée de basalte, et la croûte continentale, plus légère et granitique. Qu'en est-il sur Mars ? Les observations spectroscopiques orbitales et l'analyse de météorites en provenance de la planète rouge indiquaient une prédominance de basalte, formé lors de processus de fusion partielle du manteau martien. Toutefois, des observations en orbite suggéraient l'existence d'îlots de croûte continentale, mais seule une mesure *in situ* pouvait le confirmer. C'est ce qui vient d'être fait avec l'analyse de 22 échantillons de roche du cratère Gale par le robot *Curiosity*.

Le robot *Curiosity* explore la région nord du cratère Gale, daté de 3,61 milliards d'années et situé sur un terrain ancien. Ses parois forment une coupe géologique naturelle de 2 à 3 kilomètres d'épaisseur. Violaine Sautter, du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, et ses collègues ont utilisé l'instrument *ChemCam* installé sur le mât de *Curiosity* pour analyser la nature des roches. Il s'agit d'un spectromètre utilisant un laser pour analyser la chimie des roches et d'un imageur à haute résolution permettant d'en apprécier la texture.



Les instruments du robot *Curiosity* ont révélé des cristaux de feldspaths *(traces claires allongées)* typiques des croûtes continentales.

Les chercheurs ont ainsi découvert une variété de roches, de couleur claire, riches en feldspaths et contenant parfois du quartz, soit des compositions analogues aux roches granitiques de la croûte continentale terrestre.

Ces résultats suggèrent que, il y a 4,1 à 3,7 milliards d'années, une croûte basaltique préexistante aurait fondu en présence de fluides et engendré cette croûte continentale. Deux scénarios sont possibles : la croûte primitive dense s'est enfoncée dans la lithosphère et a partiellement fondu, ou bien un point chaud a fait fondre la croûte, comme c'est le cas en Islande. De plus amples observations seront nécessaires pour trancher entre ces pistes.

S. B.

V. Sautter et al., Nature Geoscience, en ligne le 13 juillet 2015

Des résultats de *Philae*

Le 12 novembre 2014, le robot *Philae* s'est posé sur la comète « Tchouri » dans le cadre de la mission *Rosetta*. Cependant, l'appareil a rebondi et s'est immobilisé dans une zone peu éclairée. Le robot a effectué des mesures, alimenté par ses batteries pendant deux jours. Ces premiers résultats donnent une vision inattendue de la comète. Le radar CONSERT a montré que la partie de la comète surnommée la « tête » est plus homogène qu'on ne le pensait et que sa porosité est d'environ 80 %. Les chercheurs ont identifié 16 molécules organiques avec l'analyseur chimique COSAC, dont 4 sont observées pour la première fois sur une comète, tel l'acétone. Ces composés, précurseurs et produits les uns des autres, créent une vision cohérente de la chimie dans ce milieu. Par ailleurs, ils sont aussi les précurseurs des sucres et des acides aminés, molécules essentielles à la vie. *Philae* a repris contact, par intermittence, avec *Rosetta* depuis juin 2015. D'autres mesures suivront peut-être.

Paléontologie

Un énigmatique fossile de serpent tétrapode

David Martill, de l'université de Portsmouth, a fait une trouvaille en Allemagne : un fossile de serpent à quatre pattes provenant du Brésil. Comme il était conservé depuis plusieurs décennies par un particulier, il s'agit sans doute d'un fossile détenu illégalement, le Brésil ayant interdit toute sortie de fossiles du pays depuis 1942…

La finesse du calcaire lithographique qui le contient et la couleur orange des os suggèrent qu'il pourrait provenir de la formation du Crato, au nord-est du Brésil, laquelle date de 126 à 113 millions d'années. Avec un collègue anglais et un collègue allemand, David Martill a réussi à obtenir la pièce pour décrire cette nouvelle espèce. Les chercheurs l'ont nommée *Tetrapodophis amplectus*, c'est-à-dire « constricteur à quatre pattes ».

Ils ont constaté que toutes ses caractéristiques morphologiques, sauf une, font penser à un serpent. Ainsi, *Tetrapodophis* avait un museau court, une boîte crânienne allongée, un corps serpentiforme, des écailles, des dents acérées et une mâchoire extensible pour avaler des proies plus grosses que lui. De plus, le corps a 160 vertèbres, suivies de 112 vertèbres de la queue. Il s'agit là d'un caractère crucial, puisque seuls les serpents ont plus de 150 vertèbres. Un autre argument fort est le fait que l'animal avait des écailles sur toute la largeur du ventre, trait qui n'est connu que chez les serpents. Quelle est alors l'unique raison militant contre l'idée que *Tetrapodophis* soit un serpent ? Ses quatre pattes !

S'il est bel et bien un serpent, *Tetrapodophis* est d'une grande signification paléontologique. En effet, sa queue n'est pas aplatie en forme de nageoire, mais conique : les serpents seraient donc d'origine terrestre, et non aquatique.

F. S.

Science, vol. 349, pp. 416-419, 2015

Un détail du fossile montrant les deux pattes postérieures de l'animal, situées peu avant la queue.

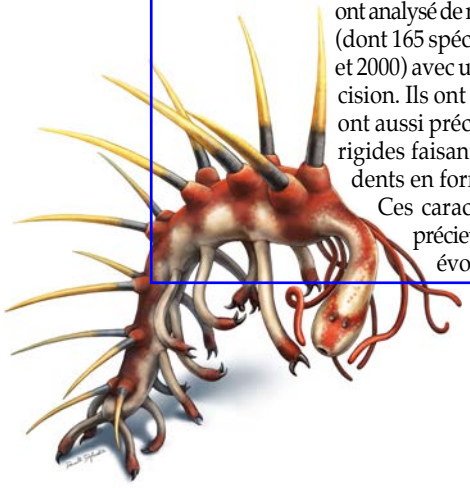
© NASA/JPL-Caltech/LANL/CNRS/IRAP/LPGN/Nantes/ASU/MSSS

Paléontologie

Hallucigenia retrouve sa tête

Avec ses sept paires de pics dorsaux, ses dix paires de pattes et tentacules, l'animal fossile *Hallucigenia* intriguait beaucoup les chercheurs qui l'ont découvert en 1977 dans les schistes de Burgess, au Canada. Les paléontologues ont d'abord pensé que les pics étaient les pattes et les pattes des tentacules sur le dos… et que la queue était la tête! *Hallucigenia* est une de ces espèces bizarres qui sont apparues au cours de l'explosion cambrienne, il y a entre 541 et 485 millions d'années, avec de nombreuses autres espèces animales et végétales.

Martin Smith, de l'université de Cambridge au Royaume-Uni, et Jean-Bernard Caron, de l'université de Toronto au Canada, ont analysé de nombreux spécimens fossilisés (dont 165 spécimens découverts entre 1992 et 2000) avec un microscope de grande précision. Ils ont ainsi pu identifier la tête. Ils ont aussi précisé la présence de structures rigides faisant le tour de la bouche et des dents en forme de pics dans le pharynx. Ces caractéristiques sont des indices précieux pour reconstruire l'histoire évolutive des proches parents de *Hallucigenia*.



S. B.

M. R. Smith et J.-B. Caron, Nature, vol. 523, pp. 73-78, 2015

Archéologie

Une vieille maison d'Amazonie

Dans un talus tranché par la création d'un chemin, non loin de Puyo en Équateur, l'équipe de Stéphen Rostain, du CNRS, a remarqué une zone noire. Il s'agissait d'un foyer rempli de restes charbonneux. Leur datation indique un âge de plus de 3100 ans.

Cette ancienneté est remarquable, puisqu'elle fait remonter le foyer à la Période formative (–2700 à –200) qui, dans les Andes voisines, est celle de l'apparition des premiers villages de paysans. Un décapage a mis en évidence une vingtaine de trous de poteaux. Le plan dessiné par les poteaux a révélé qu'une case ovale de 19 mètres par 11 (soit 220 mètres carrés) contenant un grand foyer décentré se dressait à cet endroit il y a quelque trois millénaires. Ce type d'habitation est tout simplement la version locale d'une maison longue, genre universel de demeure destinée à loger une famille élargie et ses animaux. La version amazonienne découverte par l'équipe de Stéphen Rostain est, elle, d'un modèle toujours employé par les Amérindiens de la région.

F. S.

Biologie végétale

La plante choisit ses bactéries

Le microbiote n'est pas l'apanage des animaux. Les plantes, elles aussi, vivent avec de nombreux micro-organismes, principalement des bactéries. Chez l'humain, ces microbes sont sur la peau, dans la bouche, le vagin ou l'intestin. Chez la plante, ils colonisent en particulier le sol proche de ses racines – la rhizosphère. L'ensemble des microbes associés à un organisme – son microbiote – lui est propre.

Un fait étonnant est que, bien que le sol soit riche d'une immense variété de communautés bactériennes, les quelque 10 milliards de cellules par gramme de sol qui colonisent la rhizosphère d'une plante ne représentent qu'une infime portion de cette diversité. Comment la plante « choisit-elle » ses bactéries ? Une équipe américaine vient de découvrir un mécanisme en jeu. La plante enverrait un signal depuis ses feuilles *via* une molécule, l'acide salicylique (le principe actif de l'aspirine).

L'acide salicylique est une hormone des plantes impliquée dans leur développement et leur défense contre des agents pathogènes. Il constitue un acteur clef de leur système immunitaire : synthétisé dans les feuilles en cas d'attaque par un agent pathogène biotrophique (qui se nourrit de la plante), il sert de messager et déclenche des mécanismes de résistance. Il n'est pas la seule phytohormone à remplir ce rôle. D'autres, telles que l'acide jasmonique et l'éthylène, présents dans les racines, sont activées par des bactéries nécrotrophiques (destructrices) ou des insectes mâcheurs.

Sarah Lebeis et Sur Herrera Paredes, de l'université de Caroline du Nord, à Chapel Hill aux États-Unis, et leurs collègues ont voulu savoir si ces phytohormones jouent un rôle dans la composition du microbiote racinaire. Pour ce faire, les biologistes ont comparé son génome (le microbiome) chez une plante modèle sauvage, l'arabette des dames, et divers mutants de cette plante où au moins l'une de ces phytohormones n'était plus synthétisée ou ne remplissait plus son rôle. Ils ont ainsi montré que l'acide salicylique module la composition du microbiote racinaire : tant sa synthèse que la voie de signalisation qu'il déclenche sont nécessaires pour que la composition du microbiote soit normale.

Ainsi, le système immunitaire de la plante influe directement sur la sélection des communautés microbiennes qui formeront le microbiote de sa rhizosphère. Comme chez l'animal, ces communautés participent à sa défense contre les agents pathogènes. Une piste pour améliorer le rendement des cultures ?

Marie-Neige Cordonnier

S. L. Lebeis et al., Sciencexpress, 16 juillet 2015

Une hormone synthétisée dans les feuilles de la plante orchestre la sélection des populations de microbes qui colonisent le sol autour de ses racines.

© Shutterstock.com/amenic181

Danielle Duteau

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Astrophysique

Du footballène interstellaire

Une énigme astronomique de près de 100 ans aurait trouvé un début de réponse grâce aux footballènes, ces molécules sphériques formées de 60 atomes de carbone. En 1922, Mary Lea Heger, étudiante à l'université de Californie, observa que le rayonnement émis par une étoile est absorbé à certaines longueurs d'onde (plus de 400, entre l'infrarouge proche et l'ultraviolet proche), nommées bandes interstellaires diffuses, sans doute par des composés présents dans le milieu interstellaire. Parmi les candidats possibles, les ions C_{60}^+ étaient suspectés d'absorber deux bandes particulières. John Maier, de l'université de Bâle, en Suisse, et son équipe ont confirmé cette hypothèse en mesurant en laboratoire le spectre d'absorption des ions C_{60}^+ dans des conditions comparables à celles du milieu interstellaire.

S. B.

E. K. Campbell et al., Nature, vol. 523, pp. 322-323, 2015

Génétique

L'origine du parfum de la rose

Faite d'une multitude de composés, l'odeur de la rose est surtout due à des molécules de la famille des monoterpènes. Les biochimistes pensaient qu'il n'existait qu'une seule voie de synthèse de ces monoterpènes, faisant intervenir des enzymes de la famille des terpènes synthases.

Toutefois, Jean-Louis Magnard, de l'université de Saint-Étienne, et ses collègues ont mis en évidence une nouvelle voie de biosynthèse de ces molécules qui est contrôlée par la nudix hydrolase, une enzyme codée par le gène *RhNUDX1*. Plus l'expression de ce gène dans la fleur est importante, plus cette dernière présente une quantité élevée de monoterpènes, et donc plus elle est parfumée.

À terme, les biologistes pourront utiliser le gène *RhNUDX1* comme marqueur pour sélectionner des roses très parfumées.

D. B.

J.-L. Magnard et al., Science, vol. 349, pp. 81-83, 2015

Préhistoire

Un métissage tardif avec des Néandertaliens en Europe

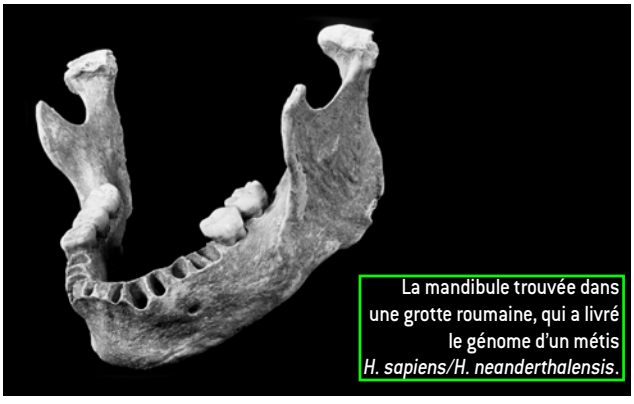
Il y a environ 45 000 ans, *Homo sapiens* arrive en Europe, tandis que *Homo neanderthalensis* disparaît. Pourquoi ? Qiaomei Fu, de l'Académie chinoise des sciences, apporte une pierre au débat : elle vient de montrer que l'ADN d'un *H. sapiens* mort il y a plus de 40 000 ans en Roumanie contient 7,3 % d'ADN néandertalien – soit trois fois plus que chez les Eurasiens actuels !

Par ailleurs, l'étude de sept segments d'ADN néandertalien représentant 1,6 à 6,3 % du génome de l'individu a montré qu'il a eu un ancêtre néandertalien 4 à 6 générations seulement avant lui. Tout aussi frappant : l'individu est plus apparenté aux Extrêmes-Orientaux et aux Amérindiens qu'aux Européens actuels…

Comment interpréter cela ? Un point semble acquis : un métissage tardif a eu lieu en Europe. Il s'est produit entre les Néandertaliens et les premiers *H. sapiens* européens qu'étaient les porteurs de la culture aurignacienne (–40 000 à –28 000 ans). Or on sait que des milliers d'années plus tard, la culture gravettienne (–31 000 à –22 000) recouvre la nappe aurignacienne. Bien plus nombreux et moins métissés que les Aurignaciens, les Gravettiens auraient dilué le métissage tardif *sapiens*/*neanderthalis* en Europe.

F. S.

Nature, en ligne le 22 juin 2015



La mandibule trouvée dans une grotte roumaine, qui a livré le génome d'un métis *H. sapiens*/*H. neanderthalensis*.

E. Trinkaus et al., PNAS, 110, 11231-11236, 2003

Une dent humaine de 550 000 ans à Tautavel

Deux jeunes archéologues amateurs ont découvert, jeudi 23 juillet, à Tautavel dans les Pyrénées-Orientales, une incisive appartenant à un individu humain et vieille de 550 000 ans. Nommé Arago 149, ce spécimen a 100 000 ans de plus que le célèbre homme de Tautavel, ce qui en fait le plus ancien humain trouvé en France. La découverte est remarquable, dans la mesure où très peu de fossiles humains datant de cette période ont été mis au jour en Europe.

De l'argile au menu des chimpanzés

En Ouganda, des chimpanzés utilisent des feuilles comme éponges pour boire de l'eau argileuse. Vernon Reynolds, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont constaté que cette habitude récente est corrélée à la disparition de palmiers *Raphia farinifera*. Comment l'expliquer ? Les feuilles de palmiers étaient pour les singes une source de minéraux, mais ils ont disparu à cause de leur utilisation par l'industrie du tabac. Les singes pourraient avoir trouvé une nouvelle source de minéraux dans l'eau argileuse, riche en sodium, calcium ou fer.

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

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Réforme du collège : l'interdisciplinarité est une bonne chose

Plusieurs expériences de projets transversaux menés en classe avec l'aide de chercheurs suggèrent que cette démarche favorise l'apprentissage.

Ange Ansour et François Taddei

Le 10 avril dernier, le Conseil supérieur de l'éducation a adopté le décret et l'arrêté qui définissent les principes de la réforme du collège en France prévue pour la rentrée 2016. Parmi les réactions que suscite cette réforme, plusieurs critiques portent sur les EPI – les enseignements pratiques interdisciplinaires que suivront les élèves de la 5e à la 3e, à raison de trois heures hebdomadaires maximum.

Ces nouveaux modules ont pour vocation de « construire et d'approfondir des connaissances et des compétences par une démarche de projet conduisant à une réalisation concrète, individuelle ou collective ». En d'autres termes, il s'agit de mener à bien des projets croisant plusieurs disciplines. Huit thématiques ont été définies, telles que « corps, santé, bien-être et sécurité » ou « sciences, technologie et société ». À l'issue du cycle, chaque élève doit avoir abordé six des huit thématiques.

Les critiques de ces EPI sont variées : « Au collège, c'est trop tôt pour ce genre d'enseignement, il faut rester sur les fondamentaux pour qu'ils soient bien acquis ; seuls les meilleurs élèves s'en sortiront ; les disciplines mères seront fragilisées par le temps qu'on leur prend ; les enseignants ne sont pas formés à une telle approche ; les infrastructures sont insuffisantes et les élèves trop nombreux… » Pourtant, divers indices en France et ailleurs suggèrent que, bien mise en œuvre, cette approche est très prometteuse, tant pour favoriser l'apprentissage que pour aider les enfants à devenir des citoyens éclairés.

Une discipline est un corpus de concepts, un champ d'investigation ou un ensemble de méthodes propres ; mais c'est aussi une construction sociale – institutionnelle et universitaire –, prise dans des enjeux et luttes de pouvoir. Les disciplines scolaires sont issues des disciplines traditionnelles de l'université. Mais alors que les savoirs de la recherche sont en mutation permanente, faits d'emprunts à d'autres domaines, ils ont été, à l'école, fractionnés et inscrits dans des pratiques très éloignées des disciplines génitrices.

Partout dans le monde, des programmes visent à renouer avec l'héritage de la recherche.

Toutefois, la raison d'être originelle des disciplines est leur valeur d'usage, c'est-à-dire leur pertinence pour faciliter la compréhension d'un monde en mutation, où ce qui compte est la capacité explicative des modèles mis en œuvre. Partant de ce constat, partout dans le monde, divers programmes pédagogiques se sont montés ces dernières années, visant à renouer avec l'héritage de la recherche scientifique et son approche interdisciplinaire. Un article paru dans *Nature* le 16 juillet dernier recense plusieurs initiatives dans ce sens.

Lancé en 2006 en Allemagne, le programme *Haus der kleinen Forscher* (la maison des petits scientifiques) est installé dans plus de 24 000 structures (crèches, garderies, écoles élémentaires) accueillant les enfants de trois à dix ans. Des enseignants formés à cette approche amènent les enfants à poser des questions sur les phénomènes naturels ou les objets du quotidien et à concevoir des activités pour tester leurs hypothèses. Le programme a fait des émules jusqu'en Australie, en Thaïlande et au Mexique. D'autres initiatives, telles que l'institut Hwa Chong à Singapour ou l'école Simon-Langton en Grande-Bretagne, visent à donner une chance à des jeunes de faire de la vraie recherche avec des équipements professionnels, dès l'adolescence.

En France, l'approche se répand aussi, notamment grâce à des organisations telles que la fondation La main à la pâte qui, depuis 1996, vise à développer à l'école primaire et au collège un enseignement des sciences fondé sur l'investigation, et le Centre de recherches interdisciplinaires (CRI), à Paris, né en 2005 de la volonté de chercheurs de former les jeunes à la démarche de projet et de promouvoir l'interdisciplinarité.

Avec le programme les *Savanturiers*, lancé en 2012, le CRI forme de jeunes élèves à cette démarche en prenant modèle sur la recherche. Élèves et enseignants sont engagés dans des projets coopératifs où ils observent, questionnent, décrivent, formulent des hypothèses, capitalisent des savoirs, expérimentent, modélisent, échangent des informations, argumentent et valident des résultats. Ces activités aident l'apprentissage et dotent les élèves de

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

bases solides pour aborder avec discernement les enjeux sociétaux de leur temps.

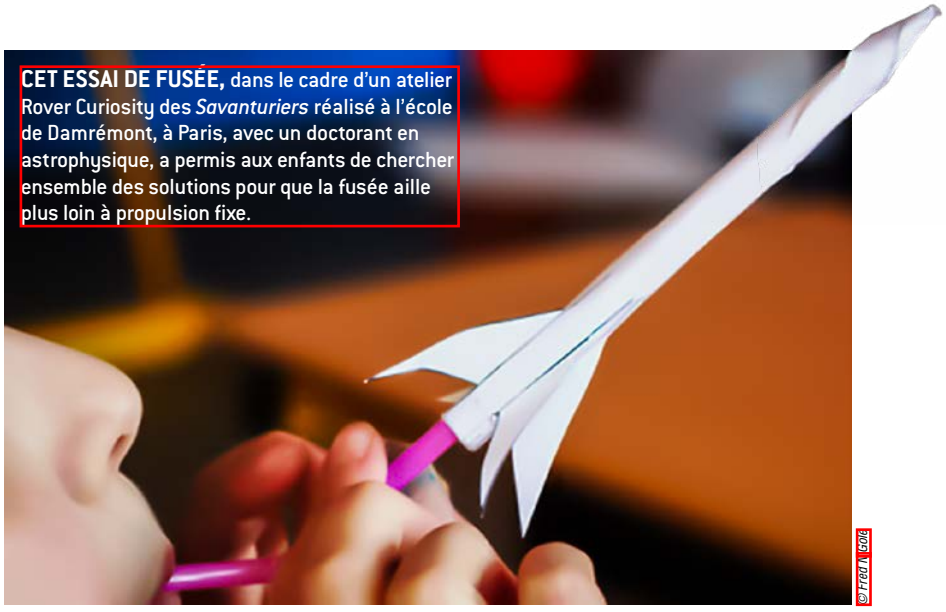
C'est un retour aux sources, corroboré par les recherches en sciences cognitives qui établissent que les processus intellectuels à l'œuvre chez l'enfant sont apparentés à ceux mobilisés par les chercheurs. En témoignent de nombreuses réalisations sporadiques d'enfants chercheurs, tel cet article de recherche sur le comportement des bourdons publié par une classe d'enfants anglais de 8 ans à l'instigation d'un parent chercheur. Notre ambition est de rendre accessible au plus grand nombre l'essence même de ces tentatives.

Le projet *Savanturiers* met en relation des chercheurs et des classes. Il permet aux élèves d'explorer un phénomène naturel ou culturel (la vie des fourmis, le changement climatique, l'action du sucre sur l'organisme, la construction d'une fusée…) en mettant à leur portée les outils et concepts des différents champs d'investigation scientifique. Les élèves écrivent, publient et partagent lors de congrès les résultats de leurs recherches. Cette approche pédagogique a donné corps, au collège Beaumarchais à Paris, à un projet exemplaire, voire préfigurateur de ce que pourraient être les EPI voulus par la réforme.

À partir de vers de compost, les élèves de 6e d'une professeure de SVT ont défini diverses problématiques aux frontières entre sciences de la vie, français et technologies de l'information. Partant de leurs questions, ils ont défini des protocoles de recherche rigoureux et mené un travail documentaire exhaustif, guidés par un biologiste de l'université Paris-Descartes. Des questions naïves telles que « Est-ce que le ver de compost entend et danse en musique ? » sont devenues une série d'expérimentations et de recherches sur la sensibilité du ver aux vibrations. En parallèle, avec leur professeure de français, les élèves se sont initiés à l'écrit scientifique et se sont engagés dans des productions littéraires et chorégraphiques sur la perception du mouvement. Tout au long de l'année, ils ont alimenté un blog sur leurs explorations, à partir duquel ils ont fait une communication en congrès.

Les *Savanturiers* ont déjà accompagné 4 500 élèves, du CM1 à la terminale, et leurs enseignants. Une étude précise de l'impact de cette approche sur la réussite des élèves, en cours sur trois ans, livrera ses résultats en 2018. Des entretiens menés auprès des enseignants impliqués révèlent déjà que l'approche favorise l'engagement des élèves dans les apprentissages – même de certains qui, jusqu'alors, avaient des difficultés. En Allemagne, une enquête menée auprès de 3 000 enseignants engagés dans le programme *Haus der kleinen Forscher* a montré que ces derniers ont gagné en confiance et s'intéressent plus à l'enseignement des sciences. Là aussi, une évaluation de l'impact sur l'apprentissage des enfants est en cours sur trois ans.

Certes, pour que cela fonctionne, plusieurs conditions doivent être réunies. Un enseignant isolé ne peut relever un tel défi. Seules des équipes engagées collectivement dans la recherche de solutions pédagogiques et didactiques sont à même de porter ce point de la réforme. Il est donc primordial que l'administration favorise la coopération des enseignants entre eux et avec le monde de la recherche, notamment en facilitant sa mise en place : plages communes de temps libre, horaires de cours compatibles, salles de cours contiguës… Nous faisons confiance aux acteurs de la réforme pour tenir compte des expériences en cours et de leurs enseignements. ■



CET ESSAI DE FUSÉE, dans le cadre d'un atelier Rover Curiosity des *Savanturiers* réalisé à l'école de Damrémont, à Paris, avec un doctorant en astrophysique, a permis aux enfants de chercher ensemble des solutions pour que la fusée aille plus loin à propulsion fixe.

© Fred Nogo

LES AUTEURS

Ange ANSOUR est professeure des écoles et coordinatrice pédagogique des *Savanturiers*.

François TADDEI, directeur de recherche à l'Inserm, dirige le Centre de recherches interdisciplinaires (CRI), à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

M. Baker, **Inner scientists unleashed**, *Nature*, vol. 523, pp. 276-278, 2015.

A.-M. Chartier, **Disciplines scolaires entre classification des sciences et hiérarchie des savoirs**, dans Y. Reuter *et al.* (dir.), *Dictionnaire des concepts fondamentaux de didactique*, De Boeck, 2013.

A. Gopnik *et al.*, **The Scientist in the Crib : Minds, Brains, and How Children Learn**, William Morrow & Co, 1999.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« Le patrimoine astronomique français est en danger »

Emmanuel PÉCONTAL est astronome et responsable du patrimoine de l'observatoire de Lyon.

Les observatoires et les lunettes historiques sont de merveilleux outils pour diffuser la science auprès du grand public. Cependant, constate Emmanuel Pécontal, faute de moyens et de personnel, ce patrimoine scientifique est menacé.

Datant de la fin du XIXe siècle et délaissé depuis des dizaines d'années, le patrimoine astronomique est aujourd'hui en déshérence : les instruments d'observation sont abîmés, voire démontés, les bâtiments interdits d'accès. Seules des initiatives individuelles et locales, ou de rares mécénats, maintiennent ces équipements précieux pour l'histoire des sciences, mais aussi pour la diffusion du savoir auprès du grand public. Il est crucial aujourd'hui de sensibiliser sur cette question afin de préserver cet héritage.

POUR LA SCIENCE
Que recouvre la notion de patrimoine astronomique ?

EMMANUEL PÉCONTAL : Il s'agit d'abord des infrastructures spécialement construites pour héberger les grands instruments, telles que les bâtiments à toit plat pour les lunettes méridiennes (instruments montés sur un axe orienté est-ouest) et ceux à coupole pour les lunettes équatoriales (dont l'axe est parallèle à l'axe de rotation de la Terre). Les instruments d'observation sont bien sûr les figures de proue de l'astronomie : la grande lunette de Nice, la lunette Arago à Paris, l'équatoriale coudée à Lyon, unique en son genre car elle est toujours en état de fonctionnement avec les pièces d'origine, la lunette méridienne de Besançon utilisée à des fins de chronométrie pour l'industrie horlogère locale, etc. Il faut aussi inclure les petits instruments et les objets auxiliaires : des accessoires montés sur rail, des laboratoires de développement de clichés photographiques, des horloges et même du matériel destiné à l'élevage d'araignées dont le fil était utilisé comme repère dans les oculaires. Et il ne faut pas oublier les livres et les carnets d'observation, qui intéressent beaucoup les historiens des sciences.

PLS
Dans quel état se trouve aujourd'hui ce patrimoine ?

E. P. : En 2011, l'Unesco a organisé un colloque sur la préservation de ce patrimoine menacé. Si l'objectif était louable, les organismes de recherche français ont été assez déçus par les résultats. L'envergure internationale des recommandations n'était pas compatible avec ce que nous constations sur le terrain : l'action est avant tout locale.

À la suite de ce colloque, j'ai entrepris de visiter les observatoires de France avec Évelyne Damm, membre de la Commission nationale de classement des monuments historiques, pour évaluer précisément la situation. Globalement, on peut dire que le patrimoine astronomique français est en danger : certains instruments sont inutilisables, les bâtiments ont besoin d'être restaurés, l'état de conservation des archives écrites est précaire…

Les instruments qui ont perdu leur usage scientifique ont connu des destins difficiles. À Paris, les lunettes équatoriales coudées ont été démontées et les pièces dispersées, ce qui rend impossible leur restauration. Celle de Besançon a aussi été démontée, mais les pièces sont conservées sur place. Les petits instruments ont souvent été recyclés, récupérés pour servir sur d'autres sites. De la même façon, on trouve des salles où sont entreposées en vrac des pièces dont il est parfois difficile de deviner à quoi elles servaient.

Certains bâtiments sont très endommagés, avec des toitures qui fuient. Dans d'autres cas, ils ont été transformés en laboratoire d'optique (Lyon), en bibliothèque (Strasbourg), en salle de conférence et d'exposition (Nice), etc.

La situation diffère selon les sites, selon les initiatives prises localement. Chaque instrument ou bâtiment a une histoire unique. Prenons l'exemple de Bordeaux. Jérôme de La Noë, directeur de l'observatoire dans les années 1980, avait œuvré pour maintenir des observations scientifiques sur le site historique, telles que le relevé de position de satellites. Cette activité, modeste, a permis de garder l'observatoire en état. À la retraite, Jérôme de La Noë a aussi participé à l'archivage des livres anciens.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

PLS

Ces observatoires ont été construits il y a plus d'un siècle. Dans quel contexte ont-ils vu le jour ?

E. P. : Sous l'Ancien Régime, il y avait en France de nombreux petits observatoires. Ils étaient rattachés aux facultés ou aux académies des sciences locales. Avec la Révolution, la science s'est concentrée à Paris. Toute la recherche astronomique s'effectuait dès lors à l'observatoire de Paris, créé en 1667. Ceux de Toulouse et Marseille subsistaient, mais avec des moyens réduits. Cette hypercentralisation a perduré pendant une grande partie du XIXe siècle, malgré les appels de scientifiques qui promouvaient le développement de la science en province, sur l'exemple de l'Allemagne réputée pour ses observatoires et ses universités répartis sur tout le territoire (car le pays n'était pas encore unifié à l'époque).

Si l'observatoire de Marseille a été restauré sous l'impulsion d'Urbain Le Verrier dans les années 1860, c'est la chute du Second Empire en 1870 qui a réellement amorcé la décentralisation. L'observatoire de Toulouse a été réorganisé en 1872. Ceux de Besançon, Lyon et Bordeaux ont été fondés sur décret en 1878. La même année, les études commençaient pour la construction de l'observatoire de Nice, entièrement financé par le banquier et mécène Raphaël Bischoffsheim, qui le légua à l'université de Paris à sa mort.

PLS

Pendant combien de temps ces observatoires de la fin du XIXe siècle ont-ils été utilisés ?

E. P. : Les observations menées à Paris étaient déjà largement dépassées du fait des pollutions diverses : pollution lumineuse, vibrations dues à la circulation, brouillard industriel… Les observatoires régionaux construits à l'écart des villes étaient mieux situés, mais les effectifs réduits n'ont pas permis de rendre à la France sa place dans l'astronomie internationale. Ils ont fonctionné pendant quelques décennies, jusqu'à ce qu'ils soient, eux aussi, rattrapés par l'urbanisation du début du XXe siècle et la pollution associée. Par exemple, à Lyon et à Nice, on a abandonné les mesures géophysiques du magnétisme terrestre, car les tramways voisins les perturbaient. Pour remédier à cette situation, des projets plus éloignés des agglomérations, tel l'observatoire de Haute-Provence, ont alors vu le jour et ont marqué la fin des observations scientifiques sur les sites historiques et le début de la déshérence de leur patrimoine instrumental.

PLS

Quand a-t-on pris conscience qu'il y avait là un patrimoine à préserver ?

E. P. : A part quelques initiatives isolées, la prise de conscience qu'il fallait protéger ce trésor a démarré dans les années 1990. Ce mouvement assez récent s'appuie encore sur la volonté de certaines personnes, par exemple Françoise Le Guet Tully, de l'observatoire de Côte-d'Azur, ou Emmanuel Davoust, astronome à l'observatoire Midi-Pyrénées. Ce dernier a écrit un ouvrage sur l'histoire de l'observatoire du Pic du Midi dont une des sources provient d'une découverte inestimable : une vingtaine de manuscrits d'Émile Marchand, directeur de l'observatoire entre 1892 et 1914. Mais, pourrissant dans un sous-sol humide, seuls deux carnets étaient encore lisibles.

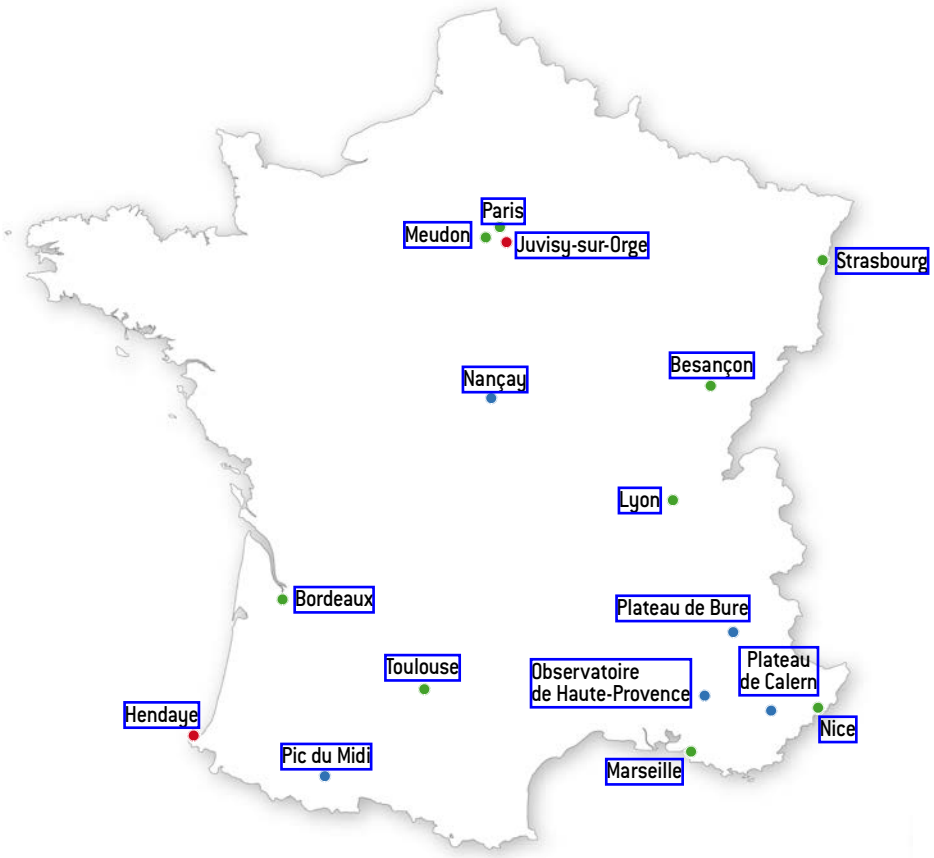
Il y a eu à partir de ces années une réelle volonté de préserver les textes retrouvés çà et là dans quelques remises des observatoires. Ils ont été envoyés dans des sites d'archives – les archives départementales à Lyon, les archives municipales à Toulouse… On a ainsi sauvé ces ouvrages de la dégradation, mais il reste à les inventorier.

On a aussi inscrit l'essentiel des bâtiments et des instruments à l'inventaire des monuments historiques pour les protéger, et certains ont même été classés. Il faut rendre hommage à Jean Davoigneau, du ministère de la Culture, et à Françoise Le Guet Tully qui ont été les principaux acteurs de ce travail

« L'astronomie fait rêver, mais observer avec une lunette de plus de cent ans, c'est magique. »

LA LUNETTE ÉQUATORIALE coudée de l'observatoire de Lyon est en cours de restauration grâce à une subvention du ministère de la Recherche et d'un mécène, la fondation Total.

© Emmanuel Peconta



LE PATRIMOINE ASTRONOMIQUE FRANÇAIS comprend des observatoires nationaux du XIXe siècle *(en vert)* et des observatoires privés *(en rouge)*. Il reste sur le territoire des sites plus récents ayant encore une activité observationnelle importante *(en bleu)*.

de classement et d'inventaire. Le patrimoine classé est préservé et l'État participe parfois à la facture de restauration même si le bien ne lui appartient pas. En contrepartie, la restauration doit obéir à de fortes contraintes, avec l'obligation de passer par l'architecte des monuments historiques. Et les contraintes s'accompagnent d'une hausse substantielle du coût des travaux.

PLS

Y a-t-il des obstacles à la préservation du patrimoine historique ?

E. P. : Il existe malheureusement une certaine compétition entre la sauvegarde du patrimoine astronomique et la recherche en cours… à plusieurs niveaux. Les laboratoires voient leurs moyens fondre et les recrutements sont en baisse. Aussi, pour certains, il faut choisir : on n'a ni les moyens ni le personnel pour entreprendre la restauration des anciens instruments. Ils mettent donc la priorité sur la recherche actuelle qui est leur mission principale. En outre, certains craignent que leur laboratoire devienne un musée et perde son statut de centre de recherche. Ce serait alors une vitrine du passé et plus du tout un endroit où l'on prépare les découvertes de demain.

PLS

Quelles sont les solutions ?

E. P. : Elles sont multiples. À Lyon, nous avons fait un appel à des dons et cherché des mécènes. La fondation Total, qui avait déjà financé des travaux à l'observatoire de Nice, nous a ainsi aidés à hauteur de 150 000 euros pour la restauration de l'équatoriale coudée, dont la facture s'élevait à 500 000 euros et pour laquelle le ministère de la Recherche avait aussi déboursé 230 000 euros. Nous continuons de chercher des aides. Les souscriptions publiques n'ont rapporté que 2 500 euros. Il est difficile de sensibiliser le grand public…

Mais le problème vient aussi du manque de personnel pour entretenir les locaux et les instruments, les restaurer, etc. Dans de nombreux cas, l'aide est fournie par des retraités bénévoles. À Lyon, la direction est sensible à la sauvegarde du patrimoine et certains membres du laboratoire participent pour une petite fraction de leur temps à ces travaux. À Toulouse, c'est une association d'amateurs… Des solutions locales, toujours…

PLS

Dans les autres pays, le patrimoine astronomique est-il aussi menacé ?

E. P. : J'ai eu l'occasion de visiter plusieurs observatoires en Europe : Saint-Pétersbourg, Barcelone, Cambridge, Berlin. La situation y est similaire. Les uns font appel à des associations, les autres à des retraités. Certains trouvent des niches permettant de maintenir une activité scientifique pour leurs instruments anciens.

Les États-Unis tirent leur épingle du jeu. Ils ont une longue tradition de mécénat qui perdure et permet de trouver plus facilement de l'argent pour entretenir des observatoires. En outre, beaucoup de ces sites furent construits très loin des villes, au sommet de montagnes, et ont donc servi beaucoup plus longtemps. Les Américains ont aussi mieux préservé leurs archives. Ils savent ainsi ce qui avait été fait dans les différents sites, et ils peuvent alors les mettre en avant et faire rayonner la science américaine.

PLS

Le plus important dans l'idée de préserver ce patrimoine n'est-il pas la volonté de l'utiliser pour diffuser la science ?

E. P. : Absolument. Nous ne voulons pas créer des musées dans lesquels on exposerait des objets inutilisables. Nous voulons faire revivre ces lieux et ces instruments. L'idée est d'accueillir le grand public et les élèves dans les observatoires pour qu'ils regardent le ciel avec les instruments. L'astronomie est une science qui fait rêver, mais observer avec une lunette de plus de cent ans, c'est magique.

En outre, à Lyon, nous fabriquons aussi des instruments qui seront utilisés sur de grands télescopes de pointe, tel VLT *(Very Large Telescope)*, au Chili. Ainsi, lors des journées « portes ouvertes », nous pouvons aussi bien montrer les beaux instruments du XIXe siècle que les techniques les plus avancées en recherche. Quelle meilleure façon de lutter contre la désaffection pour les sciences et susciter des vocations ? ■

Propos recueillis par Sean BAILLY

© ceo-graika/shutterstock.com

NANTES UTOPIALES

FESTIVAL INTERNATIONAL DE SCIENCE-FICTION

DU 29 OCTOBRE AU 02 NOVEMBRE 2015

LA CITE, LE CENTRE DES CONGRES DE NANTES

LITTERATURE, SCIENCES, CINEMA, BANDE-DESSINEE, EXPOSITIONS,
JEUX DE ROLES, JEUX VIDEO ET POLE ASIATIQUE

THEMATIQUE DE LA 16EME EDITION : « REALITE(S) »

WWW.UTOPIALES.ORG

FACEBOOK.COM/UTOPIALES.NANTES
TWITTER : @LESUTOPIALES

Lu sur SciLogs.fr
La plateforme de blogs scientifiques de Pour la Science

Les réseaux et le refus de la vaccination

par Fabienne Hild, sur le blog *In vivo - In vitro*

L'échec de la campagne de vaccination contre la grippe H1N1, en 2010, a révélé la force du discours antivaccination, en particulier *via* les réseaux sociaux. Mais si l'on se penche sur l'histoire de la vaccination, on constate que cette pratique a toujours été sujette au doute, et on peut établir un parallèle entre le rôle des réseaux sociaux actuels et celui de leurs « ancêtres », les réseaux de salons, dans la formation de l'opinion publique.

Les premières inoculations sont contemporaines des épidémies de variole dans les années 1720. L'inoculation est l'introduction, par une incision superficielle de la peau, de pus variolique desséché provenant d'un malade ayant développé la maladie de façon peu virulente. Au cours du XVIII[e] siècle, on cherche à systématiser l'inoculation. Charles Marie de La Condamine présente devant l'Académie des sciences en 1754 un mémoire en faveur de l'inoculation. Il y introduit le concept de risque. Dans un article publié en 2010 sur le site www.laviedesidees.fr, l'historien des sciences Jean-Baptiste Fressoz soulignait que « le risque rendait à la fois possible l'autonomie du jugement individuel et le contrôle des conduites ». Ainsi, toute personne devrait pouvoir évaluer et comparer les risques qu'il y a à se faire inoculer ou pas, et étayer son choix.

La Condamine pensait pouvoir amener par la raison une majorité de ses concitoyens à accepter l'inoculation. C'était sans compter l'influence des réseaux « de salons ». Dans ces lieux mondains, loin de se développer une réflexion individuelle et rationnelle, s'imposait une pensée collective opposée à la prise du risque. Cette opposition était nourrie par les discussions autour de récits d'inoculés relatant surtout les effets indésirables et les accidents. Ces récits rendaient compte de façon restrictive de l'expérience de cas isolés. Des éléments confortés par le manque de fiabilité des inoculations : leur réussite dépendait par exemple de la virulence du vecteur inoculé ou de la technique de l'inoculateur. Ces tâtonnements n'ont pas favorisé l'établissement d'une opinion fondée et, malgré de nombreux débats, peu de personnes seront finalement inoculées.

Le parallèle avec la « pandémie » de grippe H1N1 est frappant. Très peu de personnes ont choisi de se faire vacciner. Chacun devait évaluer le risque de contracter la grippe (potentiellement mortelle), d'avoir des effets secondaires à la suite de la vaccination (syndrome de Guillain-Barré, rare mais grave), ou d'être protégé. Évaluer ces risques et prendre une décision objective nécessitent des informations pertinentes. Celles-ci sont censées émaner des autorités sanitaires, qui ont un devoir d'objectivité et d'indépendance vis-à-vis des lobbies pharmaceutiques. Mais les pouvoirs publics ont eu du mal à faire passer ces informations.

L'explication tient peut-être à une mauvaise communication, entachée de nombreuses contre-informations. Mais l'impact des réseaux sociaux a aussi été sous-estimé par les autorités. Début 2010, la page « Pas vacciné contre la grippe A et toujours en vie » sur Facebook comptait près de 800 000 fans ! Ces réseaux, comme autrefois les salons, diffusaient une pensée orientée en ne relayant que les convictions d'une minorité surreprésentée. De plus, sur ces médias, il y a peu de possibilités de dialogue ou de vérification des sources, comme le nécessite pourtant une controverse. Enfin, peu de sites internet, hormis les sites institutionnels, soutenaient la vaccination. Il y avait au contraire une prédominance des sites antivaccinaux, qui ne représentent que partiellement la population.

Qu'ils soient d'hier ou d'aujourd'hui, les réseaux permettent le partage d'informations et d'idées. Mais ils favorisent une certaine uniformité des messages. Il est plus que jamais important de croiser les sources d'information pour se faire une opinion étayée ! ■

Le médecin britannique Edward Jenner (1749-1823) en train de pratiquer la variolisation sur un enfant.

Fabienne HILD, enseignante, est l'un des auteurs du blog In vivo - In vitro du master Science et société de l'université de Strasbourg (http://www.scilogs.fr/invivo-invitro/).

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.sciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Versions numériques
OFFERTES*
sur www.pourlascience.fr

Offre PASSION

POUR LA SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science **(12 nos)**
+
Le hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science **(4 nos)**

79€ seulement
1 AN - 16nos

* des numéros reçus pendant la durée de votre contrat en cours uniquement

VOS **AVANTAGES** ABONNÉ

- ✔ **27 % d'économie et plus** par rapport au prix en kiosque
- ✔ L'envoi des magazines **en avant-première**
- ✔ La garantie de ne **manquer aucun numéro**

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner, accompagné de votre règlement, dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science Service abonnements – Libre réponse 90 382- 75 281 Paris cedex 06

POUR LA SCIENCE

OUI, je m'abonne à *Pour la Science* (12 nos/an) + *Dossier Pour la Science* (4 nos/an) :

❑ **1 an • 16 numéros • 79 €** au lieu de ~~108€~~ → Offre disponible en ligne sur **www.pourlascience.fr/pls/passionne**
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35€.

❑ **2 ans • 32 numéros • 148 €** au lieu de ~~217€~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34 € – autres pays 72 €.

Le mensuel

Le trimestriel

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
_____
_____
CP : ☐☐☐☐☐ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire
Numéro de carte ☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐
Date d'expiration ☐☐☐☐
Clé ☐☐☐
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

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

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ❑**

Offre réservée aux nouveaux abonnés jusqu'au 30/04/2015

PLS455

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

L'informatique, l'écolier et l'hôtelier

L'exemple des hôtels, qui ont perdu la mainmise sur leurs réservations, montre pourquoi il faut enseigner l'informatique.

Cette rentrée des classes est peut-être la dernière du XX^{e} siècle en France, car, dès la rentrée prochaine, un enseignement d'informatique devrait enfin être proposé à tous les élèves, de l'école primaire au lycée.

Même si cette introduction de l'informatique à l'école suscite une assez grande adhésion de la part des élèves et de leurs parents, elle a aussi ses détracteurs. Et parmi leurs arguments, l'un d'eux mérite notre attention : « Il n'est pas plus utile de connaître les principes de la programmation, de l'algorithmique, des bases de données ou des réseaux, que de savoir changer les segments de pistons du moteur de sa voiture. » Au-delà de la question de l'enseignement de l'informatique, cet argument est parfois invoqué par ceux qui souhaitent reléguer les enseignements scientifiques et techniques dans les filières technologiques, pour que les filières générales puissent se consacrer à la seule connaissance digne de ce nom à leurs yeux : les humanités.

Cet argument s'appuie cependant sur le présupposé qu'il se trouvera toujours des techniciens à qui sous-traiter l'entretien ou la réparation de sa voiture. Ce présupposé semble valide dans le cas de la mécanique automobile, mais l'est-il dans le cas de l'informatique ? Pour répondre à cette question, appuyons-nous sur un exemple : les sites web de réservation de chambres d'hôtel.

Les métiers de l'hôtellerie comportent traditionnellement deux aspects. Le premier est d'héberger les voyageurs, le second est d'échanger de l'information avec eux – leur faire savoir qu'il y a un hôtel à un certain endroit et recueillir leurs souhaits d'hébergement. Ce second aspect a été complètement transformé par l'apparition du Web : plus besoin d'enseigne clignotante ni de service de réservation téléphonique, il suffit d'annoncer son hôtel sur un site web et d'y récolter les réservations. De ce fait, on aurait pu penser que les hôteliers eussent été les premiers à développer des sites web de réservation en ligne, tels booking.com ou airbnb.com. Mais comme ils étaient pour la plupart ignorants des développements du Web et fidèles à l'idée de sous-traiter les tâches techniques aux techniciens, ils ont laissé d'autres le faire.

PRÈS DE 50 % DES RÉSERVATIONS de chambres d'hôtel ne passent plus directement par les établissements concernés.

Et là, coup de théâtre : contrairement aux mécaniciens de l'automobile, les développeurs de ces sites ne les ont pas vendus aux hôteliers, mais ont décidé de les exploiter eux-mêmes et d'utiliser le pouvoir que cette exploitation leur donnait pour imposer des commissions extravagantes, parfois un quart de leur chiffre d'affaires, aux hôteliers. De plus, comme héberger un voyageur n'est finalement pas si difficile, de nombreux « hôtels » sans enseigne – des « logements de particuliers » – sont apparus.

Là où les hôteliers auraient dû se concentrer sur leur cœur de métier, l'échange d'information avec leurs clients – quitte à sous-traiter l'hébergement proprement dit –, ils l'ont sous-traité à d'autres qui, rusés comme Dame Belette, y ont porté leurs pénates. Les hôteliers peuvent aujourd'hui jurer qu'on ne les y reprendra plus, il est un peu tard. Pour préserver leur autonomie, ils auraient dû être les premiers à développer ces sites. Ils n'ont pas programmé, ils se retrouvent désormais programmés.

En fait, le plus surprenant dans cette histoire n'est pas que les développeurs des sites de réservation en ligne aient pris le pouvoir sur les hôteliers. Il est que, au XX^{e} siècle, les mécaniciens n'aient pas pris le pouvoir sur les automobilistes, qu'ils aient constamment vendu leur savoir sans profiter du pouvoir conféré par ce savoir. L'explication réside sans doute dans la différence entre la structure des coûts en mécanique et en informatique, l'industrie de cette dernière ayant une tendance naturelle au monopole.

Quant aux écoliers en France, espérons que, dès l'année prochaine, ils évitent de suivre l'exemple de leurs aînés. ■

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

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

LE FORUM DU CNRS

Que reste-t-il à découvrir ?

PARIS, LA SORBONNE
13 ET 14 NOVEMBRE 2015

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

CENT CHERCHEURS VOUS RÉPONDENT

#ForumCNRS
leforum.cnrs.fr

EN ASSOCIATION AVEC Le Monde

© C. Hellio / CNRS Photothèque / B. Bocé, B. Tagy, O. Lignon, J.J. Ma... Kotu, artoto | a.com

cnrs
www.cnrs.fr

PARIS2015 LA RECHERCHE SE MOBILISE POUR LE CLIMAT

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

MAIRIE DE PARIS

AIR LIQUIDE Creative Oxygen

SUEZ environnement

POUR LA SCIENCE

EDF

SAFRAN

casden BANQUE POPULAIRE

SAINT-GOBAIN

SOLVAY

LVMH RECHERCHE PARFUMS & COSMÉTIQUES

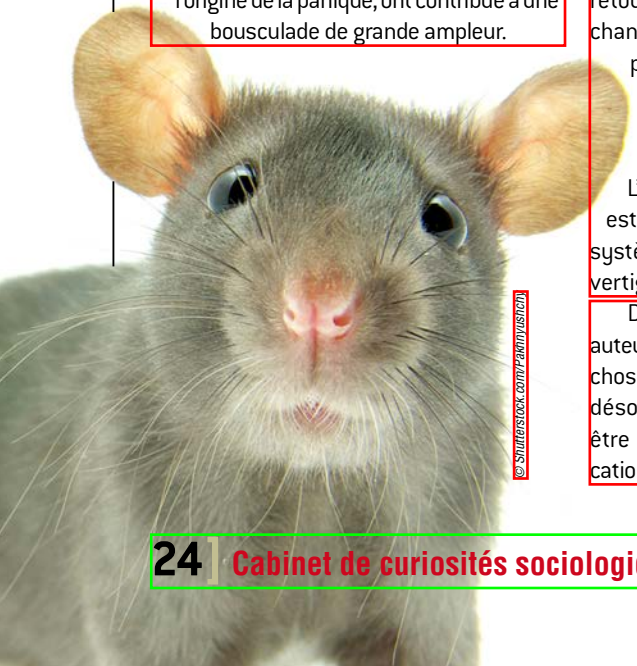
CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

La souris et l'effet papillon

Un incident récent au Maroc illustre le fait que, dans les sociétés humaines aussi, de petites causes peuvent avoir de grands effets imprévisibles.

Une curieuse affaire est survenue récemment dans une mosquée au Maroc : une petite souris a fait 81 blessés. Cet événement présente de l'intérêt pour qui veut penser la complexité des phénomènes sociaux.

Que s'est-il passé le 13 juillet 2015 à la mosquée Hassan II de Casablanca ? Difficile de le savoir exactement, mais les témoignages indiquent que le bâtiment religieux, plein comme un œuf pour la nuit du Destin, un moment important du Ramadan, a été le théâtre d'une panique collective. À l'origine, une souris se serait faufilée dans la salle dévolue à la prière des femmes et l'une d'elles se serait mise à crier. Les autres femmes ont-elles aussi vu la souris ? Toujours est-il que plusieurs se sont mises à hurler à leur tour et à s'enfuir, amplifiant le premier moment de terreur. Le mouvement s'est alors étendu aux autres croyants qui, probablement sans connaître l'origine de la panique, ont contribué à une bousculade de grande ampleur.



© Shutterstock.com/Panmyvishchn

Ce qui est frappant ici, c'est qu'une cause minuscule, dans tous les sens du terme, a eu des conséquences importantes et difficilement prévisibles.

Dans l'une de ses nouvelles de science-fiction intitulée *Un coup de tonnerre*, Ray Bradbury narre une histoire se déroulant en 2055 et mettant en scène un chasseur nommé Eckels. Celui-ci résiste difficilement à la proposition d'une agence de voyage lui offrant d'aller chasser le tyrannosaure 60 millions d'années plus tôt. Un tel voyage est périlleux et le protocole imposé par l'agence de voyage est drastique : il ne faut pas prendre le risque de modifier l'histoire universelle. Une passerelle flottant à quelques centimètres de sol lui sert de frontière à ne dépasser en aucun cas. Un incident contraint malgré tout Eckels à poser un pied sur le sol du Mésozoïque. Rien de grave semble-t-il. Pourtant, à son retour en 2055, les choses paraissent changées : un fasciste vient d'arriver au pouvoir, le climat n'est plus du tout le même, etc. Sous la botte de Eckels, il y a non seulement de la boue, mais aussi un papillon écrasé par inadvertance. L'avertissement donné par Bradbury est clair : la moindre modification dans un système peut aboutir à des conséquences vertigineuses.

Difficile de savoir si la nouvelle du célèbre auteur de science-fiction y est pour quelque chose, mais la figure du papillon incarne désormais cette idée qu'un système peut être profondément altéré par une modification infime de ses conditions initiales. En physique, c'est le météorologue américain Edward Lorenz qui popularisa cette idée, notamment lors d'une conférence de 1972 intitulée : « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ? ». La réponse à cette question est à présent bien connue du grand public sous le nom d'effet papillon et constitue souvent une introduction idéale à la notion de chaos déterministe.

L'hypersensibilité aux conditions initiales rend assez bien compte de l'anecdote tragi-comique de la souris dans la mosquée et de nombre de faits sociaux qui, pour cette raison, appartiennent sans doute à la famille des phénomènes chaotiques. Ici, le contexte de tension et de crainte d'une action terroriste, notamment durant le Ramadan, a dû contribué à l'interprétation par excès dont ont été victimes les nombreux croyants présents ce soir-là à Casablanca. En même temps, on constate que cette panique s'est dissipée et n'a pas essaimé au-delà des murs de la mosquée. C'est là un exemple passionnant pour qui cherche à modéliser les phénomènes sociaux.

Cette anecdote nous rappelle aussi un fait simple, mais qui donne à méditer : les systèmes dans lesquels nous vivons sont étonnamment solides, car ils paraissent souvent indifférents à de nombreuses perturbations, et en même temps paradoxalement fragiles quand ils se montrent, de façon imprédictible, hypersensibles à certaines conditions initiales. ■

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

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Actuellement en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

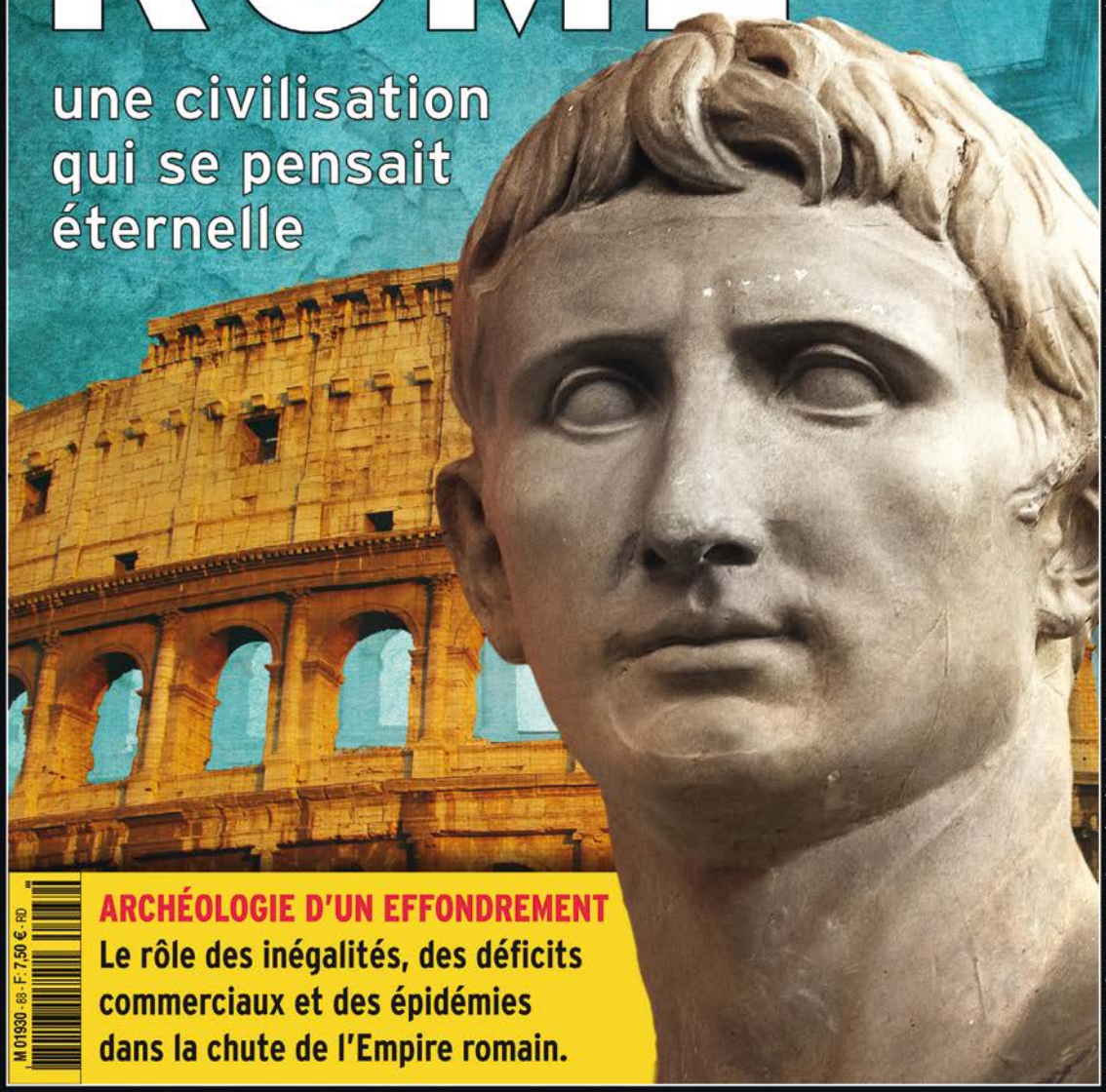
DOSSIER POUR LA SCIENCE - SOCIOLOGIE - ÉCONOMIE - ART DE VIVRE - ARCHÉOLOGIE

POMPÉI, CITÉ DES PLAISIRS

Fresques, accessoires, graffitis... révèlent une sexualité différente de la nôtre

ROME

une civilisation qui se pensait éternelle



ARCHÉOLOGIE D'UN EFFONDREMENT

Le rôle des inégalités, des déficits commerciaux et des épidémies dans la chute de l'Empire romain.

M 01930 - 88 - F: 7,50 € - RD

Belgique : 8,90€ - Canada/S : 12,50 CAD-Guadeloupe/Martinique/Guyane/Réunion/St Martin/S : 8,90€-Luxembourg : 8,50€-Maroc : 100 Dh- Nlle Calédonie Wallis /A : 2 290 CFP-Nlle Calédonie Wallis / S : 1 260 CFP-Polynésie française /A : 2 290 CFP-Polynésie Française / S : 1 260 CFP-Suisse : 16,20 CHF-Portugal : 8,50€

N° 88 Juillet-Septembre 2015

pourlascience.fr

n°88 – 120 pages – prix de vente : 7,50 €

www.pourlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Les gluons nous posent encore des colles

Rolf Ent, Thomas Ullrich et Raju Venugopalan

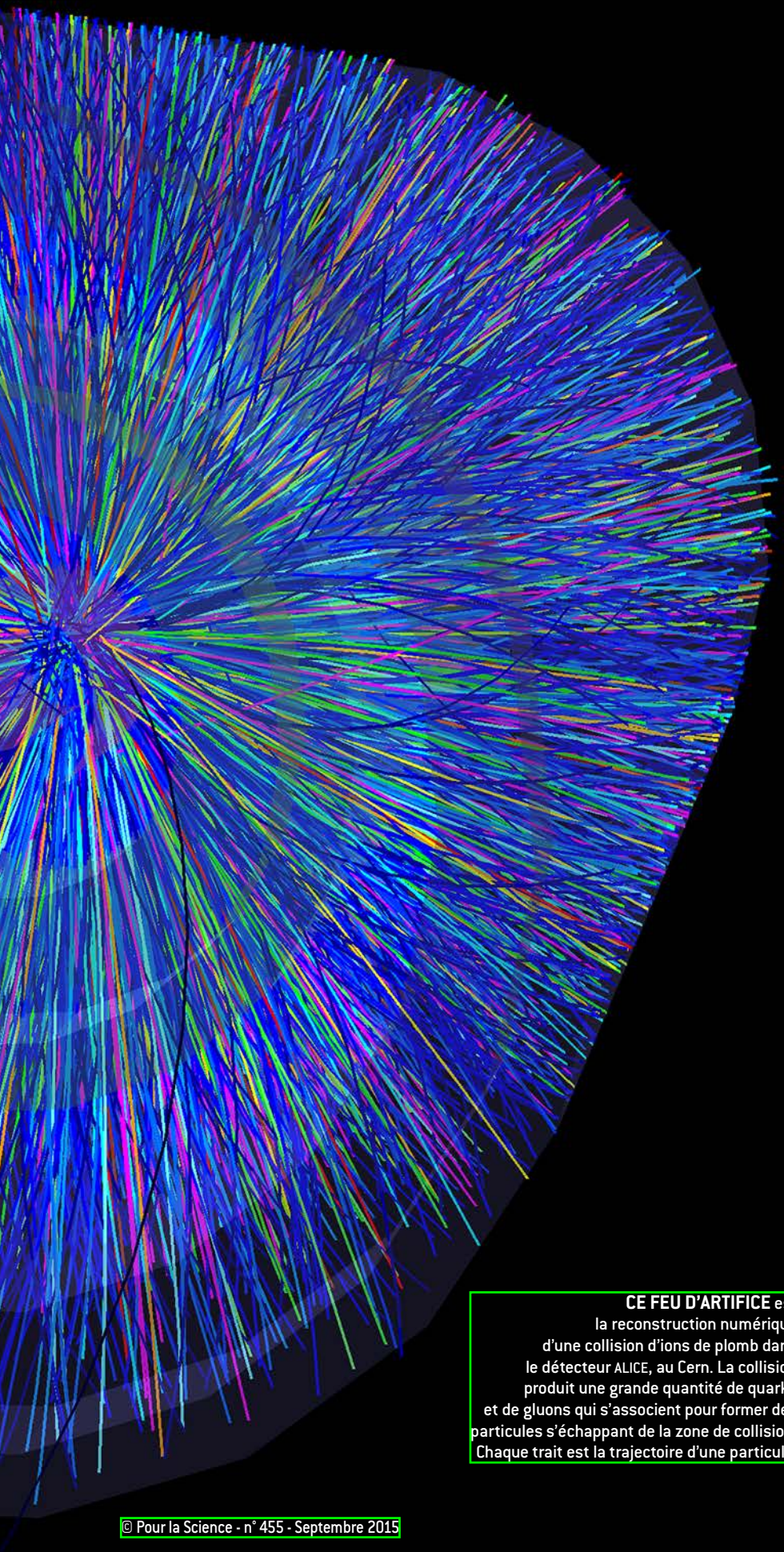
En liant les quarks, les gluons assurent la cohésion du proton ou du neutron, ainsi que celle des noyaux atomiques. Par quels mécanismes ? Les physiciens n'ont pas encore toutes les réponses.

L'ESSENTIEL

- Les particules du noyau atomique et d'autres sont composées de quarks, liés entre eux par des gluons.
- Les physiciens cherchent à comprendre les propriétés du proton et du neutron, telles que leur masse ou leur spin, à partir de celles des quarks et des gluons.
- Malgré de nombreux progrès, des énigmes demeurent.
- Grâce à des expériences futures, les physiciens comprendront mieux les assemblages de quarks et de gluons, voire découvriront de nouveaux états de la matière.

© CERN/ALICE

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



CE FEU D'ARTIFICE est la reconstruction numérique d'une collision d'ions de plomb dans le détecteur ALICE, au Cern. La collision produit une grande quantité de quarks et de gluons qui s'associent pour former des particules s'échappant de la zone de collision. Chaque trait est la trajectoire d'une particule.

Pour certains philosophes grecs de l'Antiquité, les atomes étaient les plus petits constituants de l'Univers. Or les physiciens du XX^{e} siècle ont cassé l'atome, révélant des ingrédients plus petits encore : des protons, des neutrons et des électrons. Par la suite, ils ont montré que les protons et les neutrons étaient eux-mêmes constitués de particules plus petites, les quarks, maintenues solidaires par des gluons, des particules qui servent de « colle » comme leur nom l'indique. Grâce à diverses expériences, les chercheurs ont découvert que la structure des protons et des neutrons cache un foisonnement de particules : trois quarks, mais aussi des gluons et une « mer » de paires quark-antiquark qui naissent et disparaissent en permanence.

Les expériences ont en outre montré que les protons et neutrons ne sont pas les seules particules de l'Univers à être constituées de quarks. Une multitude d'autres particules, collectivement nommées hadrons, sont des assemblages de trois quarks ou des combinaisons d'un quark et d'un antiquark.

Depuis l'hypothèse de l'existence des quarks, émise il y a près de cinquante ans, les physiciens ont développé une théorie pour décrire les interactions des quarks et des gluons. Cette théorie a été confirmée auprès des accélérateurs de particules, mais, malgré une bonne compréhension de la façon dont les quarks et les gluons interagissent, certaines propriétés de ces particules échappent encore aux chercheurs. Par exemple, les physiciens ont tenté d'expliquer les caractéristiques des protons, des neutrons et des autres hadrons à partir de celles des quarks et des gluons, mais ils se heurtent à des difficultés. Ainsi, la somme des masses des quarks et des gluons contenus dans un proton est très

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

loin de rendre compte de la masse totale du proton, ce qui nous laisse face à une première question : d'où provient le reste ? Nous ne comprenons pas non plus comment une grandeur quantique, le spin (le moment cinétique intrinsèque) du proton, découle des spins des quarks et des gluons qu'il contient : la somme de ces spins ne correspond pas à celui du proton.

Si les physiciens parvenaient à répondre à ces questions, nous pourrions comprendre comment la matière fonctionne à son niveau le plus fondamental, mais aussi comment se comportait l'Univers à ses premiers instants. L'étude des quarks et des gluons conduit en effet à étudier des états exotiques de la matière qui ont été ceux de l'Univers primordial.

Pour comprendre pourquoi les rouages de la physique des quarks et des gluons sont si difficiles à appréhender, prenons l'exemple du calcul de la masse du proton, qui taraude les physiciens depuis longtemps. Nous avons une relativement bonne compréhension de la façon dont les particules fondamentales *(voir l'encadré ci-dessous)* acquièrent leur masse. D'après le modèle standard de la physique des particules, le mécanisme est lié au boson de Higgs et au champ de Higgs associé, qui est omniprésent dans l'espace. Les interactions d'une particule avec ce champ lui confèrent une masse (qui est proportionnelle à l'intensité de ces interactions). Le boson de Higgs, clef de voûte du modèle standard, a été découvert en 2012 au LHC (le *Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) du Cern, près de Genève, confirmant ainsi une nouvelle fois la validité de cette théorie.

On entend souvent dire que le mécanisme de Higgs est à l'origine de la masse de toute la matière visible dans l'Univers, mais cette affirmation est incorrecte. Cette matière est constituée d'atomes, donc principalement de protons et de neutrons. Or la masse des quarks qui les composent ne représente que 2 % de leur masse. Les 98 % restant seraient le fait des gluons, qui sont pourtant dépourvus de masse (ils n'interagissent pas avec le champ de Higgs).

Pour comprendre la nature de la contribution des gluons, il faut se rappeler la célèbre relation de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, $E = mc^2$, qui montre une équivalence entre la masse m d'une particule au repos et son énergie E, la lettre c désignant la vitesse de la lumière dans le vide. En principe, il faudrait donc déterminer l'énergie des gluons pour obtenir celle du proton ou du neutron, et en déduire la masse correspondante $m = E/c^2$.

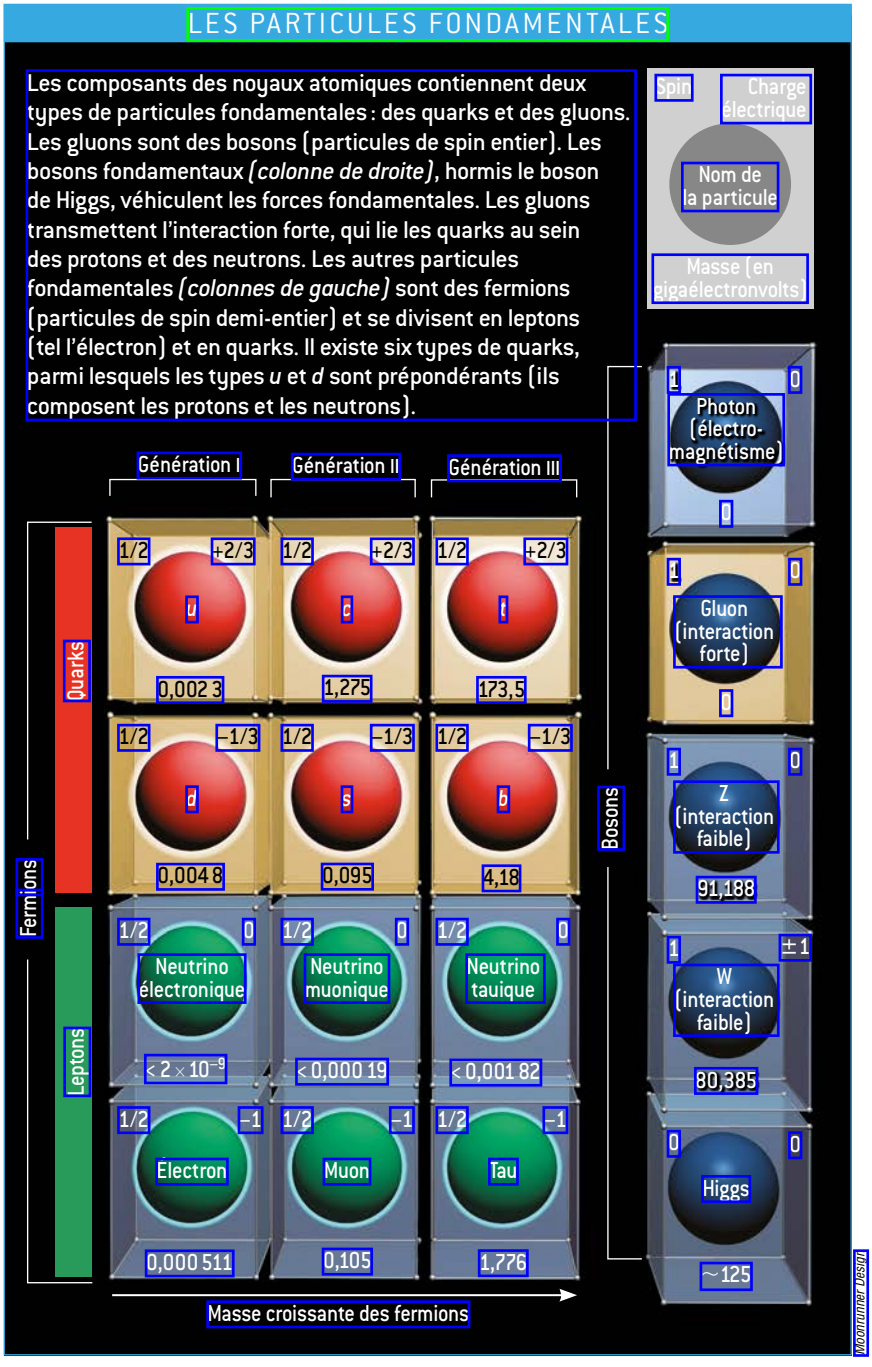
Les gluons font 98 % de la masse du proton

Il est difficile de calculer l'énergie des gluons, en partie parce qu'elle provient de plusieurs contributions. Quand une particule est libre, c'est-à-dire non liée à d'autres, son énergie est celle de son mouvement (l'énergie cinétique) ; mais les quarks et les gluons ne sont pratiquement jamais libres. Ils ne subsistent en tant que particules libres que très brièvement (moins de 3×10^{-24} seconde) avant de se retrouver liés au cœur des hadrons. L'énergie d'un gluon ne provient donc pas seulement de son mouvement ; elle résulte aussi de l'énergie dépensée dans sa liaison avec les autres particules, les quarks.

Pour calculer la masse du proton, il faut donc bien comprendre comment les gluons « collent ». Quel a été, pour ce faire, le cheminement des physiciens ? Revenons

LES PARTICULES FONDAMENTALES

Les composants des noyaux atomiques contiennent deux types de particules fondamentales : des quarks et des gluons. Les gluons sont des bosons (particules de spin entier). Les bosons fondamentaux *(colonne de droite)*, hormis le boson de Higgs, véhiculent les forces fondamentales. Les gluons transmettent l'interaction forte, qui lie les quarks au sein des protons et des neutrons. Les autres particules fondamentales *(colonnes de gauche)* sont des fermions (particules de spin demi-entier) et se divisent en leptons (tel l'électron) et en quarks. Il existe six types de quarks, parmi lesquels les types *u* et *d* sont prépondérants (ils composent les protons et les neutrons).



© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Les gluons assurent la cohésion

des assemblages de quarks que sont le proton et le neutron, ainsi que celle du noyau atomique.

sur les étapes qui ont conduit au développement de la théorie qui décrit l'interaction des quarks et des gluons.

Avant les années 1960, les physiciens ne comprenaient pas la stabilité d'un noyau atomique, composé de neutrons et de protons : la répulsion électromagnétique entre protons, particules de charge positive, devait rompre la cohésion du noyau. Les chercheurs ont donc supposé qu'une force attractive, plus forte que la répulsion électrique entre protons, s'exerce entre les nucléons (protons et neutrons) : l'« interaction forte ».

Par ailleurs, la découverte de plusieurs hadrons dans les années 1950 a conduit les physiciens américains Murray Gell-Mann et George Zweig à postuler que les hadrons ne sont pas des particules élémentaires, mais qu'ils sont composés de « quarks ». Les physiciens ont confirmé l'existence des quarks en 1969 dans des expériences de « diffusion profondément inélastique » au SLAC, le Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford. Il s'agit de bombarder des cibles composées de protons avec des électrons accélérés. En général, les électrons traversent les protons sans dévier, mais parfois ils heurtent quelque chose et rebondissent. L'analyse des vitesses et directions des électrons déviés a révélé la présence de particules chargées ponctuelles – les quarks – à l'intérieur des protons. Aujourd'hui, nous en connaissons six types, notés *d*, *u*, *s*, *c*, *b* et *t*. Le proton est ainsi composé de deux quarks *u* et un *d* ; le neutron, de deux quarks *d* et un *u*.

L'interaction forte maintient les quarks au sein des hadrons et assure la cohésion de l'assemblage de protons et neutrons qu'est le noyau atomique. Elle est la plus puissante des quatre forces fondamentales de la nature (les autres sont la force gravitationnelle, la force électromagnétique et l'interaction faible). De la même façon que le photon véhicule l'interaction électromagnétique, le gluon véhicule l'interaction forte : cette force agit entre deux quarks par des échanges de gluons, dont l'existence a été confirmée à partir de 1979 grâce à l'accélérateur PETRA, à Hambourg.

LES AUTEURS

Rolf ENT est directeur adjoint pour la physique nucléaire expérimentale à l'accélérateur américain Thomas Jefferson de Newport News.

Thomas ULLRICH est chercheur au Laboratoire américain de Brookhaven et à l'université Yale.

Raju VENUGOPALAN dirige le groupe de théorie nucléaire au Laboratoire américain de Brookhaven.

Si l'on poursuit la comparaison entre les interactions forte et électromagnétique, on trouve des différences surprenantes. D'après la mécanique quantique, la portée d'une force est inversement proportionnelle à la masse de ses médiateurs. L'interaction électromagnétique a ainsi une portée infinie, car son médiateur, le photon, est de masse nulle. À l'inverse, la portée de l'interaction forte ne s'étend pas au-delà du noyau atomique. Cela suggère que les gluons seraient massifs. Or, comme nous l'avons dit, ils sont de masse nulle comme le photon.

L'interaction forte a une autre particularité : la force s'exerçant entre deux quarks est d'autant plus intense qu'ils sont distants l'un de l'autre. C'est le contraire de l'interaction électromagnétique entre deux charges ou deux aimants. Les expériences de diffusion profondément inélastique ont montré que l'attraction entre quarks est faible à courte distance ; mais à plus grande distance, à cause du phénomène de confinement sur lequel nous reviendrons plus tard, on n'observe aucun quark isolé, ce qui implique que leur attraction mutuelle est extrêmement forte.

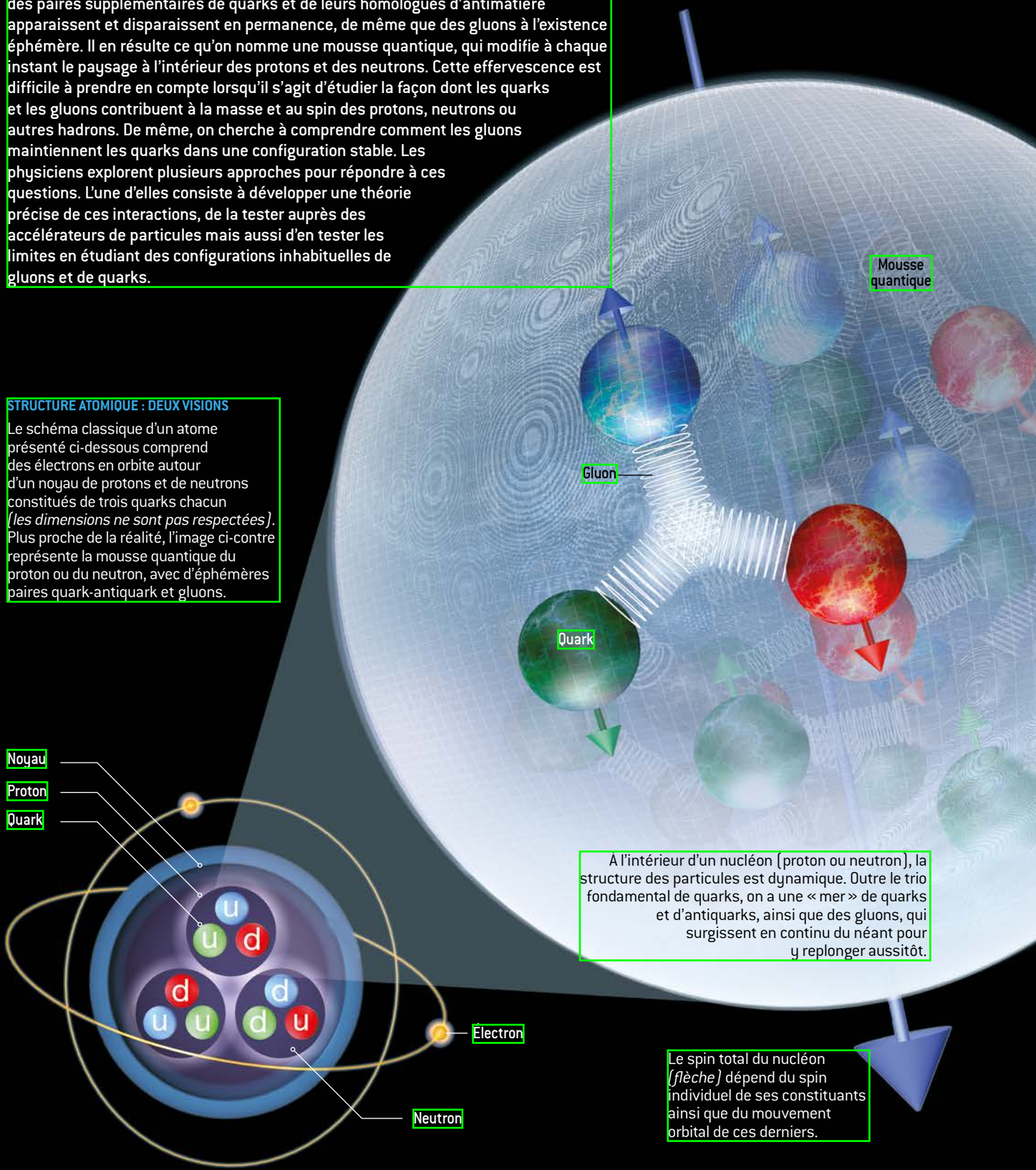
Pour visualiser comment fonctionne cette force, imaginez deux quarks reliés par un élastique. Quand ils sont proches l'un de l'autre, la tension de l'élastique se relâche et les quarks ne semblent être soumis à aucune force. Mais quand ils s'éloignent l'un de l'autre, la tension de l'élastique les retient. L'intensité de cette force agissant entre quarks est de l'ordre de 160 000 newtons (soit le poids d'une masse de 16 tonnes à la surface de la Terre) s'exerçant sur des distances de l'ordre de la taille d'un proton.

L'interaction forte maintient les quarks dans les hadrons, mais que se passe-t-il si une force extérieure s'y oppose et la dépasse ? L'élastique casse. Comment précisément cette rupture se produit-elle ? Nous n'avons pas encore de description satisfaisante du processus, qui est pourtant un élément clef pour comprendre comment les gluons collent à l'intérieur des noyaux atomiques, mais ne se dispersent pas au-delà.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

QUARKS ET GLUONS : LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE EN QUESTION

Chacun des protons et des neutrons qui constituent les noyaux des atomes contient trois quarks primaires liés par des gluons. Outre ces trois quarks principaux, des paires supplémentaires de quarks et de leurs homologues d'antimatière apparaissent et disparaissent en permanence, de même que des gluons à l'existence éphémère. Il en résulte ce qu'on nomme une mousse quantique, qui modifie à chaque instant le paysage à l'intérieur des protons et des neutrons. Cette effervescence est difficile à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'étudier la façon dont les quarks et les gluons contribuent à la masse et au spin des protons, neutrons ou autres hadrons. De même, on cherche à comprendre comment les gluons maintiennent les quarks dans une configuration stable. Les physiciens explorent plusieurs approches pour répondre à ces questions. L'une d'elles consiste à développer une théorie précise de ces interactions, de la tester auprès des accélérateurs de particules mais aussi d'en tester les limites en étudiant des configurations inhabituelles de gluons et de quarks.



STRUCTURE ATOMIQUE : DEUX VISIONS

Le schéma classique d'un atome présenté ci-dessous comprend des électrons en orbite autour d'un noyau de protons et de neutrons constitués de trois quarks chacun *(les dimensions ne sont pas respectées)*. Plus proche de la réalité, l'image ci-contre représente la mousse quantique du proton ou du neutron, avec d'éphémères paires quark-antiquark et gluons.

À l'intérieur d'un nucléon (proton ou neutron), la structure des particules est dynamique. Outre le trio fondamental de quarks, on a une « mer » de quarks et d'antiquarks, ainsi que des gluons, qui surgissent en continu du néant pour y replonger aussitôt.

Le spin total du nucléon *(flèche)* dépend du spin individuel de ses constituants ainsi que du mouvement orbital de ces derniers.

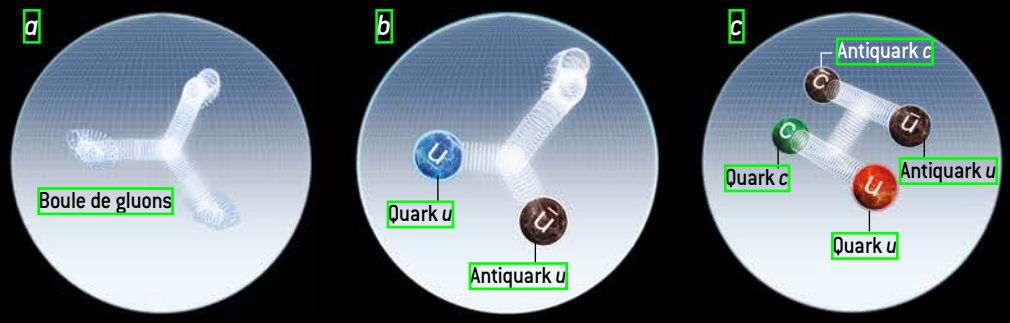
© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

ÉTATS EXOTIQUES DE LA MATIÈRE

Les physiciens ont imaginé, et dans certains cas créé, des combinaisons inhabituelles de quarks et de gluons se démarquant des protons et des neutrons familiers. Ces états exotiques offrent de nouvelles possibilités pour étudier les interactions susceptibles de se produire entre quarks et gluons.

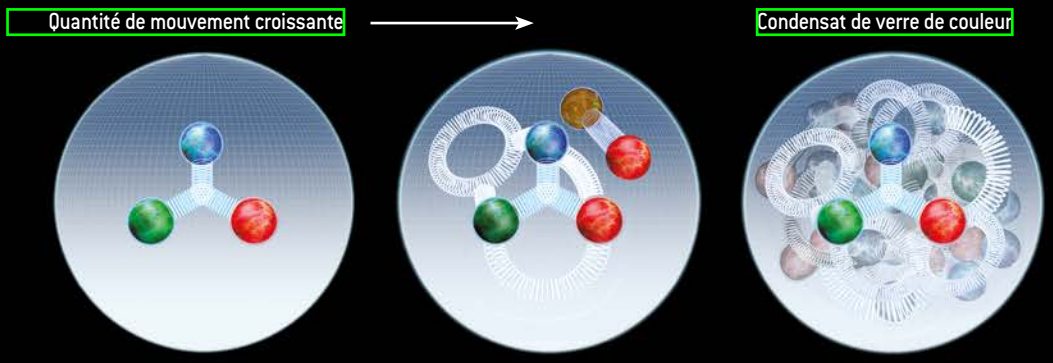
Boules de gluons et autres édifices

Des simulations théoriques suggèrent que les quarks et les gluons peuvent se combiner pour créer, par exemple, des « boules de gluons » *(a)* constituées exclusivement de gluons, ou des particules « hybrides » formant un assemblage quark-antiquark-gluon *(b)*, ou encore des « tétraquarks », états liés de deux antiquarks et de deux quarks *(c)*. Plusieurs indices expérimentaux suggèrent que des tétraquarks ont été observés. Les boules de gluons et les états hybrides restent à découvrir.



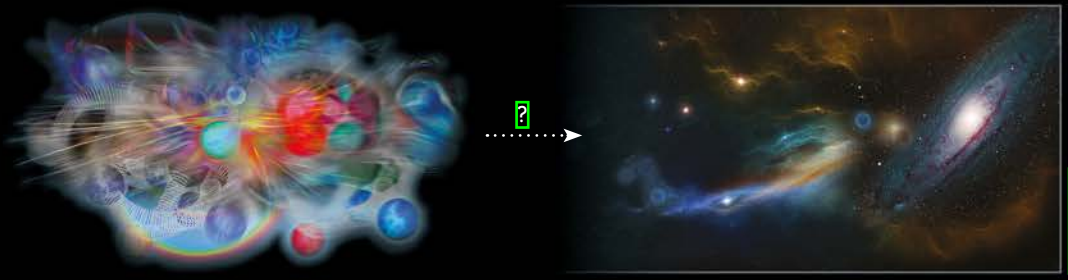
État saturé

Quand le proton (ou le neutron) est accéléré à des vitesses extrêmes, la théorie prévoit que ses gluons se multiplient. À mesure que son énergie augmente, le proton atteint un état d'occupation maximale qui ne peut plus loger davantage de gluons, un état théorique nommé « condensat de verre de couleur ». Des indices obtenus auprès des accélérateurs de particules suggèrent que ces condensats existent, mais une preuve décisive manque.



Reproduire l'Univers des débuts

Quand le cosmos était jeune, il était trop chaud pour que des protons et des neutrons stables se forment. Les quarks et les gluons s'agitaient librement, en tous sens, dans ce qu'on nomme un plasma de quarks et de gluons *(vue d'artiste ci-dessous à gauche)*. Sur Terre, des accélérateurs reproduisent cet état en fracassant des noyaux atomiques les uns contre les autres à des vitesses proches de celle de la lumière. En étudiant le plasma qui se refroidit, les physiciens glanent des informations sur le comportement des quarks et des gluons, mais aussi sur l'évolution de l'Univers juste après sa formation.



Tétraquarks et pentaquarks : d'autres structures hadroniques

Dans son article de 1964 décrivant les hadrons comme constitués de quarks, le physicien Murray Gell-Mann suggérait l'existence possible de structures à quatre ou cinq quarks différentes des baryons, particules composées de trois quarks, et des mésons, particules composées d'une paire quark-antiquark.

L'un des présupposés de la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte, est le « confinement », à savoir que la charge de « couleur » d'une particule libre est toujours nulle. Ainsi, les quarks ne sont jamais observés isolément, ils sont toujours associés pour former des hadrons « incolores » ou « blancs ». Par exemple, le proton est « blanc » car il est composé d'un quark « rouge », d'un « bleu » et d'un « vert ». Le méson J/ψ est incolore car il contient un quark d'une couleur et un antiquark portant l'anticouleur, « bleu » et « antibleu » par exemple. En suivant ces règles sur les couleurs, il est possible d'imaginer au moins deux autres configurations incolores : le tétraquark, composé de deux quarks et deux antiquarks, et le pentaquark, que l'on peut aussi voir comme un baryon et un méson fortement liés.

En 2013, les expériences Belle, au Japon, et Bes III, en Chine, ont mis en évidence le tétraquark $Z_c(3900)$ formé d'un quark *c*, un quark *u*, un antiquark *d* et un antiquark *c*. L'année suivante, un autre tétraquark, Z(4 430), était confirmé par l'expérience LHCb, au Cern. Il contient un quark *c*, un quark *d*, un antiquark *u* et un antiquark *c*. La quête des pentaquarks a été plus longue et plus tumultueuse. En 2003, une première détection potentielle d'un pentaquark, 1,5 fois plus lourd que le proton, au synchrotron japonais SPring-8, avait ensuite été infirmée par une expérience similaire à l'accélérateur américain JLab.

L'existence des pentaquarks s'est manifestée par hasard grâce à des physiciens de l'expérience LHCb. Ils étudiaient le processus de désintégration d'une particule nommée B^0 dans les données enregistrées entre 2009 et 2012. Mais en cherchant à estimer comment la désintégration d'une autre particule, Λ_b^0, interférait avec leur résultat, ils ont découvert que cette désintégration passait par deux états intermédiaires ne correspondant pas à des particules classiques. Ces états intermédiaires seraient des pentaquarks de masses 4 380 et 4 450 mégaélectronvolts.

Ces pentaquarks seraient constitués de deux quarks *u*, un quark *d*, un quark *c* et un antiquark *c*. Ils sont d'une certaine manière l'association d'un proton et d'un méson J/ψ. Les cinq quarks sont-ils fortement liés entre eux ou le pentaquark est-il plutôt une sorte de molécule baryon-méson dont la liaison provient des effets résiduels de l'interaction forte ? Avec le redémarrage du LHC depuis juin 2015, les physiciens espèrent collecter plus de données pour étudier de plus près ces pentaquarks et en découvrir d'autres.

– Sean Bailly

Dans les années 1970, les physiciens ont construit la théorie qui décrit mathématiquement l'interaction forte et que l'on nomme chromodynamique quantique (ou QCD, pour *Quantum ChromoDynamics*). Au cœur de cette théorie, on trouve une notion de charge, analogue à la charge électrique pour l'interaction électromagnétique. La charge en QCD, nommée « couleur », se décline en trois variétés fondamentales (notées par exemple « rouge », « vert » et « bleu »).

Chaque quark porte l'une de ces trois couleurs. Il semble que la nature interdise qu'une particule colorée se déplace librement : on parle de confinement des quarks et des gluons. Ainsi, les quarks s'associent de façon à former des hadrons « sans couleur » ou « blancs ». Par exemple, le proton est constitué de trois quarks portant chacun une couleur différente (« rouge », « vert » et « bleu » donnent du « blanc ») ; le méson π, ou pion, se compose d'un quark d'une certaine couleur et d'un antiquark portant l'« anticouleur » correspondante (par exemple, « rouge » et « antirouge » donnent du « blanc »).

Les gluons portent aussi une charge de couleur (en huit combinaisons possibles). Ils interagissent donc directement non seulement avec les quarks, mais aussi entre eux. Ce comportement est très différent de l'électromagnétisme, où le photon ne porte pas de charge électrique et n'interagit donc pas directement avec d'autres photons.

Liberté asymptotique et confinement

Les physiciens ont montré que l'autointeraction des gluons joue un rôle central dans la « liberté asymptotique », le fait que l'interaction de deux quarks devienne très faible à très courte distance. Voyons comment.

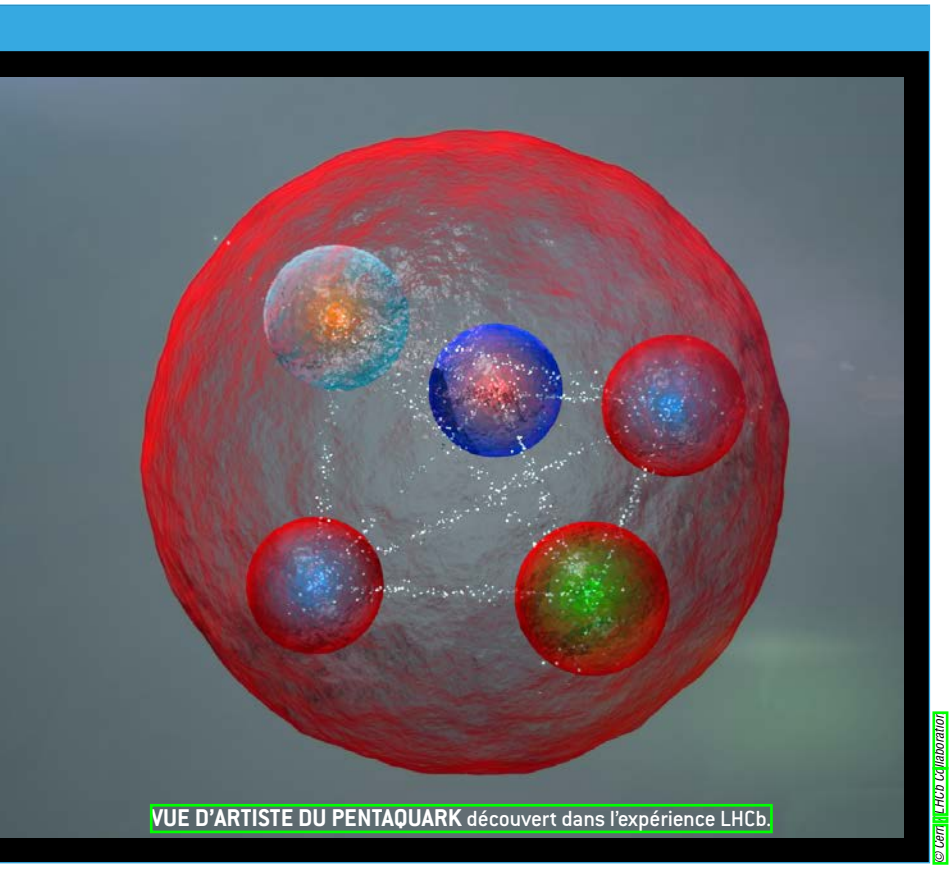
Autour d'un quark A, des paires quark-antiquark éphémères peuvent, selon les principes de la mécanique quantique, se former spontanément. Ces paires de quarks virtuels tendent à masquer un peu la charge de couleur du quark A aux « yeux » d'un quark B situé à proximité : il y a « écrantage » de la charge de couleur.

Si le quark B se rapproche du quark A, il y aura moins de paires de quarks virtuels pour écranter la charge de A. Ainsi, la force s'exerçant entre les quarks A et B, qui dépend de la charge de couleur visible, augmenterait quand la distance AB diminue, comme dans l'interaction électromagnétique. Cependant, en QCD, il faut aussi considérer les paires de gluons virtuels qui apparaissent autour du quark A. En 1973, les physiciens américains David Gross, Frank Wilczek et David Politzer ont calculé qu'une paire de gluons virtuels a un effet opposé et supérieur à celui d'une paire de quarks virtuels. Ainsi, quand la distance entre les quarks A et B diminue, la force décroît et devient quasi nulle : c'est la liberté asymptotique. Les trois physiciens ont été récompensés par le prix Nobel en 2004 pour ces travaux.

Lorsque la distance entre les particules est très faible, la force est peu intense du fait de la liberté asymptotique. Il est alors possible d'utiliser des méthodes éprouvées pour calculer, par approximations successives, les grandeurs physiques. Dans les décennies qui ont suivi l'élaboration de la QCD, de nombreuses expériences ont confirmé les prévisions de cette théorie, qui est désormais l'un des piliers du modèle standard de la physique des particules.

En revanche, lorsqu'il faut considérer des distances plus importantes, ne serait-ce

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



VUE D'ARTISTE DU PENTAQUARK découvert dans l'expérience LHCb.

© cern | LHCb collaboration

que pour calculer la masse d'un proton, d'importantes difficultés surgissent. Les équations de la QCD deviennent fortement non linéaires et nécessitent d'utiliser une approche numérique particulière, développée en 1974 par le physicien américain Kenneth Wilson et nommée QCD sur réseau.

Le principe de la QCD sur réseau est de discrétiser l'espace-temps (les trois dimensions d'espace et la dimension de temps) selon un réseau dont les mailles ont des côtés de longueur a. Il est alors possible de réexprimer les équations de la QCD dans un formalisme de physique statistique pour lequel les physiciens savent conduire les calculs. On fait ensuite tendre le paramètre a vers zéro pour retrouver le cas physique d'un espace-temps continu. En 2015, en améliorant cette méthode, Laurent Lellouch, physicien du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont réussi à calculer la différence de masse entre le proton et le neutron avec une très grande précision.

Cependant, si l'on considère des échelles de distance encore plus grandes, il est très difficile d'utiliser le formalisme de la QCD pour calculer des propriétés en physique nucléaire, par exemple pour expliquer comment les effets résiduels de l'interaction forte dans les protons et les neutrons suffisent à surmonter la répulsion entre protons et à maintenir la cohésion du noyau.

Un problème à un million de dollars : prouver que les équations de la QCD garantissent le confinement des quarks et des gluons au sein d'assemblages incolores.

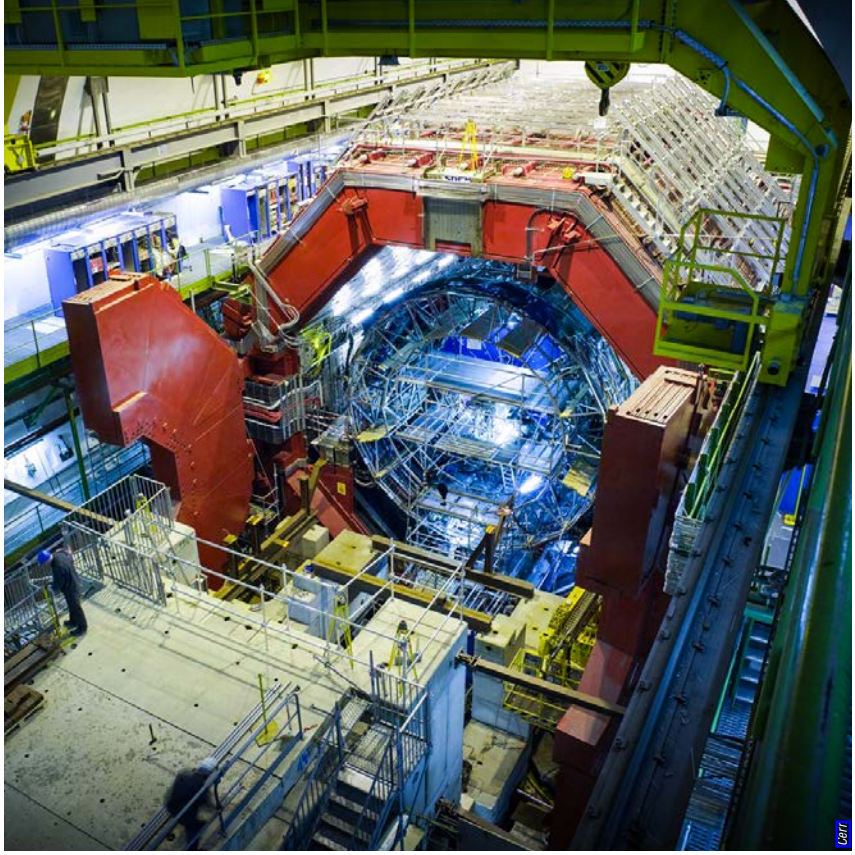
À ces échelles se pose aussi la question du confinement, à savoir que seuls des systèmes incolores de quarks et de gluons sont observés. Les physiciens cherchent encore à comprendre en vertu de quel principe fondamental un hadron doit être incolore, la QCD ne donnant pas d'explication à ce fait. Il manque une preuve mathématique que les équations de la QCD garantissent la propriété de confinement. Cette question constitue d'ailleurs l'un des six problèmes du prix du millénaire de l'institut Clay de mathématiques, dont la solution vaudra à son auteur une récompense de un million de dollars.

Une mousse quantique de particules

L'une des conséquences remarquables de la QCD est que le nombre de gluons et de quarks présents à l'intérieur du proton peut varier considérablement. Outre les trois quarks principaux, un nombre variable de gluons et de paires quark-antiquark naissent et disparaissent en permanence ; le résultat est une « mousse quantique » fluctuante de particules. D'après les physiciens, quand les protons et les neutrons sont accélérés et atteignent des énergies extrêmes, les gluons présents à l'intérieur des protons se scindent en paires de nouveaux gluons, dont chacun a moins d'énergie que son parent. Ces gluons produisent à leur tour d'autres gluons d'énergie encore inférieure.

Cette multiplication en cascade des gluons évoque une machine à pop-corn qui s'emballe. La théorie suggère qu'elle pourrait se poursuivre sans fin – mais nous savons que ce n'est pas le cas. Si les gluons continuaient de se multiplier, le couvercle de la machine à pop-corn finirait par sauter ; en d'autres termes, le proton deviendrait instable.

La matière étant à l'évidence stable, l'emballement doit être maîtrisé d'une façon ou d'une autre. Une hypothèse est qu'un effet de saturation interviendrait quand les gluons sont si nombreux qu'ils commencent à se chevaucher au sein du proton. Les gluons les moins énergétiques se recombineraient pour former des gluons



LE DÉTECTEUR ALICE AU LHC est dédié à l'étude du plasma de quarks et de gluons qui se forme lors de collisions d'ions lourds de plomb.

plus énergétiques. Le proton atteindrait un état d'équilibre, entre les divisions et les recombinaisons des gluons, qui ramènerait la machine à pop-corn sous contrôle.

Les physiciens n'ont que des indices de l'existence de cet hypothétique état saturé en gluons – aussi nommé « condensat de verre de couleur » – et ses propriétés ne sont pas complètement comprises. En sondant les protons par des expériences de diffusion profondément inélastique plus puissantes que celles actuellement à notre portée, les physiciens seront en mesure d'examiner les gluons de près dans leur forme la plus dense. Une question est, par exemple, de savoir si le phénomène qui limite la quantité de gluons s'accumulant au sein du condensat de verre de couleur est le même que celui qui assure le confinement. Si oui, l'observation du même phénomène dans des contextes différents apporterait de nouveaux éclairages sur le comportement des gluons.

Une autre question intrigue encore les chercheurs, celle du spin. En principe, le spin du proton provient de l'ensemble des spins des quarks et des gluons qui le composent. On s'attendait à ce que les quarks contribuent le plus mais, dans les années 1980 et 1990, grâce à des expériences de diffusion profondément inélastique, les physiciens ont estimé cette part à environ 30 % seulement du spin total. La détermination de la part des gluons, plus difficile à mesurer, a exigé des expériences de diffusion plus précises. En 2014, les résultats obtenus par les expériences au RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider* ou Collisionneur d'ions lourds relativistes), aux États-Unis, et ceux de l'expérience Compass, au Cern, ont conduit à l'estimation que les spins des gluons représentent quelques dizaines de pour cent du spin du proton, mais avec des incertitudes importantes.

Spin du proton : le compte n'y est pas

Une autre contribution au spin pourrait venir du moment cinétique orbital des quarks et des gluons. Une analogie céleste illustre cette possibilité. Le moment cinétique du Système solaire est dû à la rotation des planètes sur leur axe auquel s'ajoute leur mouvement orbital autour du Soleil. Les quarks, antiquarks et gluons confinés au sein des protons bougent et sont donc associés à un mouvement orbital. Pour comprendre l'importance de ce mouvement orbital, nous devons cartographier les vitesses et les positions des quarks et des gluons au sein d'un proton. L'un de nous (Rolf Ent) travaille actuellement sur des expériences de diffusion profondément inélastique avec des faisceaux d'électrons de très haute intensité. La résolution atteinte devrait permettre d'obtenir des images en trois dimensions de la matière au cœur des protons.

Les quarks et les gluons nous réservent encore des surprises et, pour approfondir notre compréhension de leurs interactions, nous devons les étudier non seulement dans les cas familiers des protons, neutrons et autres particules bien connues des physiciens, mais aussi dans des configurations plus exotiques.

En effet, la chromodynamique quantique prévoit l'existence d'états hadroniques très différents. Par exemple, des simulations suggèrent qu'il pourrait exister des « boules de gluons » contenant exclusivement des gluons, des « molécules » composées de quatre ou cinq quarks ou des entités hybrides répertoriées comme des états liés quark-antiquark-gluon. Mais les indices expérimentaux en faveur de l'existence de ces hadrons exotiques sont encore limités *(voir l'encadré page 32)*. Cette situation pourrait changer grâce à des recherches expérimentales en cours. En particulier, une installation dédiée, GlueX, entre en service à l'accélérateur américain Thomas Jefferson (le « JLab ») de Newport, en Virginie.

Les physiciens étudient également un autre état extrême de la matière connu sous le nom de plasma de quarks et de gluons. Il se forme quand des noyaux atomiques entrent en collision à des vitesses proches de celle de la lumière. Les théoriciens soupçonnent que, dans ces conditions, les neutrons et les protons des deux noyaux voient leurs condensats de verre de couleur voler en éclats, cassant le confinement des quarks et des gluons et libérant l'énergie du condensat pour créer une « soupe » de quarks et de gluons. Ce plasma est la matière la plus chaude jamais créée sur Terre, avec une température de plus de 4 000 milliards de degrés Celsius *(voir l'entretien avec François Gelis page 36)*.

Le plasma de quarks et de gluons présente une forte ressemblance avec les conditions de l'Univers primordial. Les chercheurs des laboratoires qui créent ces plasmas (au RHIC américain et dans les expériences ALICE, ATLAS et CMS au LHC, *voir la figure ci-dessus*) analysent maintenant les fluides les plus petits et les plus parfaits au monde. En observant le refroidissement de ces plasmas, deux d'entre nous (Thomas Ullrich et Raju Venugopalan) et d'autres physiciens accèdent à de nouveaux éléments pour

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

comprendre comment l'Univers a évolué. En outre, en orchestrant précisément la destruction de protons et de neutrons en plasma, les chercheurs peuvent étudier à rebours le confinement, en espérant y découvrir les secrets de l'assemblage des quarks et des gluons.

Un avenir qui s'annonce riche en résultats

En plus des projets que nous avons cités, d'autres sont déjà à l'étude. Pour cartographier avec encore plus de précision la configuration des quarks et des gluons au sein des hadrons, il faudrait augmenter l'énergie des collisions. Ainsi, au lieu d'accélérer des électrons et les projeter contre des noyaux immobiles, les deux types de particules seraient accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière avant de subir une collision frontale. Des projets sont à l'étude au JLab et à Brookhaven pour atteindre une résolution de l'ordre d'un millième du rayon du proton.

Un projet tel que le collisionneur électron-ion EIC *(Electron-Ion Collider)* atteindrait des intensités de faisceaux inégalées. Avec une plus grande densité de particules dans les faisceaux, les collisions de diffusion profondément inélastique seraient plus fréquentes que dans les expériences précédentes. Les chercheurs produiront alors de nombreux clichés révélant les entrailles des protons et des neutrons.

Durant les quatre décennies qui ont suivi la formulation de la chromodynamique quantique, les physiciens ont réalisé de nombreuses avancées pour expliquer pourquoi l'interaction forte se comporte comme elle le fait. Mais il manque encore quelques pièces pour créer un tableau simple et cohérent de la façon dont les gluons collent. Les dispositifs en cours de développement aujourd'hui nous donnent l'espoir que, d'ici une quarantaine d'autres années, nous aurons enfin percé le mystère de la constitution de la matière à son niveau le plus fondamental. ■

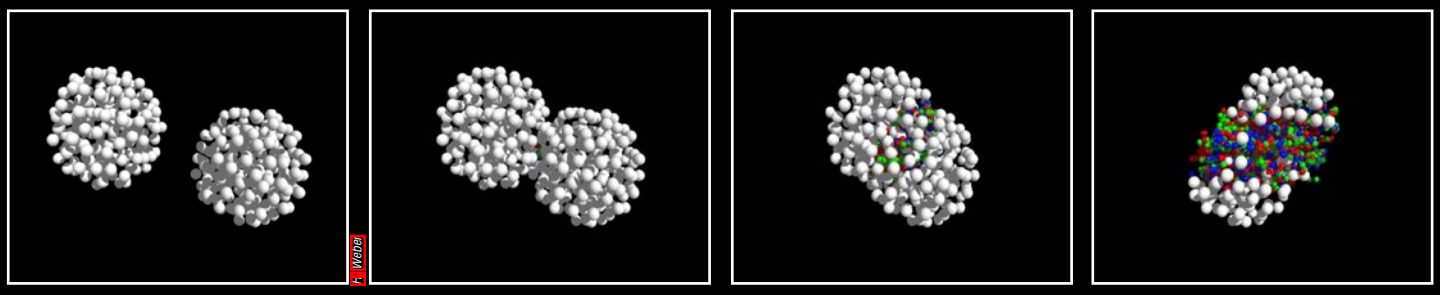
BIBLIOGRAPHIE

Collaboration LHCb, **Observation of J/ψ p resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \to J/\psi K^- p$ decays**, soumis à *Phys. Rev. Lett.*, 2015.

M. Riordan et W. A. Zajc, **Les premières microsecondes de l'Univers**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

H. D. Politzer, **Reliable perturbative results from strong interactions ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1346-1349, 1973.

D. J. Gross et F. Wilczek, **Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1343-1346, 1973.



« Le plasma quarks-gluons se comporte comme un fluide parfait »

François GELIS est physicien à l'Institut de physique théorique du CEA-Saclay.

Entretien avec François Gelis

Au moyen de collisions à haute énergie entre noyaux atomiques, les physiciens créent un « plasma quarks-gluons ». Ils étudient les propriétés de cet état de la matière qui s'est aussi formé dans les premiers instants de l'Univers.

POUR LA SCIENCE
Qu'est-ce qu'un plasma de quarks et de gluons ?

FRANÇOIS GELIS : Il s'agit d'un état de la matière composé de quarks et de gluons où ces particules sont quasi libres et ne sont plus confinées dans des états liés de deux ou trois quarks, les hadrons. Ce plasma se forme dans des conditions extrêmes qui étaient celles de l'Univers quelques microsecondes après sa naissance : une température de l'ordre de 2 000 milliards de degrés et une densité six fois supérieure à celle d'un noyau atomique. L'Univers s'est ensuite refroidi. Du fait du phénomène de confinement de l'interaction forte, les quarks et les gluons ont formé des hadrons, tels les protons et les neutrons. Sur le plan cosmologique, le plasma de quarks et de gluons primordial n'a pas laissé de traces observables.

PLS
Dès lors, comment peut-on étudier cet état de la matière ?

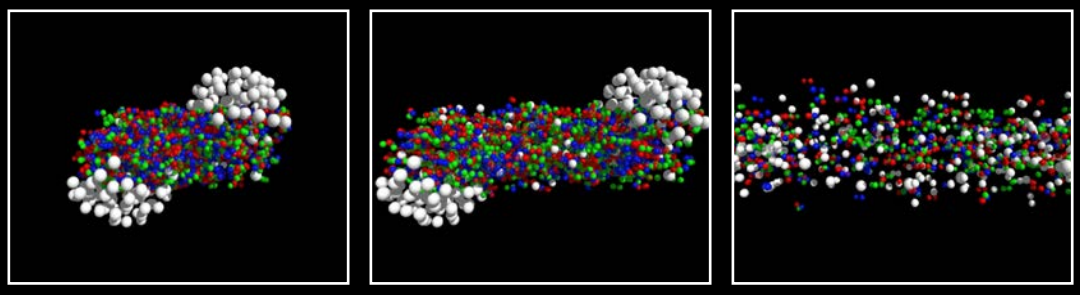
F. G. : Nous sommes capables de créer les conditions appropriées dans un accélérateur de particules en procédant à des collisions de noyaux atomiques lourds, tel le plomb. La collision de protons, par exemple, ne donnerait pas une densité suffisante pour former un plasma quarks-gluons. Les premières expériences datent des années 1970, mais le premier plasma a été observé au Cern en 2000. En 2004, les physiciens du collisionneur RHIC, aux États-Unis, ont montré que le plasma de quarks et de gluons se comporte comme un fluide parfait, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans résistance.

Le LHC, au Cern, est l'accélérateur le plus puissant actuellement. Il procède principalement à des collisions de protons (ce qui a permis la découverte du boson de Higgs en 2012), mais une partie de son programme est consacrée à des collisions proton-noyau et noyau-noyau. Avec une expérience dédiée à l'étude de ces plasmas, ALICE, mais aussi avec les expériences CMS et ATLAS, les physiciens du LHC ont confirmé les résultats de RHIC et ont obtenu des mesures quantitatives montrant qu'il est possible de décrire l'expansion du plasma de quarks et de gluons au moyen de modèles hydrodynamiques.

PLS
En quoi le plasma quarks-gluons a-t-il des propriétés comparables à celles d'un fluide ?

F. G. : Par exemple, il est caractérisé par une viscosité, et l'une des grandes découvertes dans ce domaine a été sa mesure. Quand deux noyaux entrent en collision *(voir les premières images ci-dessus)*, une goutte de plasma *(les particules en couleur dans les images)* se forme puis se dilate dans le vide environnant. On mesure sa viscosité par des moyens

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



LA COLLISION DE NOYAUX LOURDS *(à gauche)*, composés de protons et neutrons *(boules blanches)*, conduit à la formation d'un plasma de quarks et de gluons *(boules de couleur)*. Les images de cette simulation illustrent comment le plasma s'étend et se refroidit. Puis les quarks se recombinent pour former des hadrons dont des protons et des neutrons *(les boules blanches, à droite)*.

indirects, car la durée de vie du plasma est trop courte pour que l'on accède directement à ses caractéristiques. Lorsque le plasma devient moins dense, les quarks se lient et forment des hadrons *(les boules blanches sur la dernière image)* qui filent jusqu'aux détecteurs. On analyse alors la nature des particules détectées, leur énergie et leur impulsion. Ces informations dépendent de la viscosité du plasma. En comparant les données obtenues aux modèles, on trouve que le plasma a une viscosité très faible.

PLS

En termes d'interactions des particules, que signifie un plasma peu visqueux ?

F. G. : De façon contre-intuitive, la faible viscosité du plasma est ici synonyme d´interactions fortes. En effet, une petite viscosité signifie que les ondes acoustiques sont très faiblement atténuées dans le fluide, c'est-à-dire que les transferts d'impulsion d'un constituant à un autre *via* leurs collisions sont très efficaces, ce qui n'est possible que s'ils interagissent fortement. Au début de la collision, le couplage qui quantifie l'intensité de l'interaction forte est petit car la distance entre particules est courte (c'est le phénomène de liberté asymptotique). Mais la densité du plasma étant élevée, les interactions sont nombreuses, ce qui compense la faible intensité de la force. Quand la densité baisse à mesure que la goutte de plasma grossit, le couplage augmente, d'où le maintien d'une forte interaction entre les constituants.

PLS

Qu'en est-il de la température ?

F. G. : Mesurer la température du plasma est complexe, étant donné la très courte durée de vie de la goutte. L'approche est, là encore, indirecte. Nous étudions la formation de différents mésons lourds (constitués d'un quark et d'un antiquark). Au-dessus d'une certaine température, les interactions empêchent ces mésons de se former. Ils apparaissent au-dessous d'un seuil de température que l'on peut calculer avec les modèles. Ces mésons ont une durée de vie très courte et se désintègrent en d'autres particules avant d'atteindre les détecteurs. Nous déterminons leur présence en reconstruisant à l'envers le processus de désintégration.

Nous évaluons ainsi deux moments clefs dans le plasma qui se refroidit : celui où la température est assez basse pour que les réactions qui changent la nature des particules soient négligeables (on parle de « gel chimique ») et celui où la température a assez diminué pour que les collisions élastiques qui transfèrent de l'énergie d'une particule à une autre soient faibles (on parle de « gel cinétique »).

PLS

Quelle température atteint ainsi le plasma ?

F. G. : Les gels se produisent autour de 1 500 milliards de degrés (environ 140 mégaélectronvolts, ou MeV). On met ainsi une borne inférieure à la température à laquelle se produit la transition quarks-hadrons, quand les quarks échappent au confinement en hadrons et forment un plasma. Cette transition se ferait autour de 1 750 milliards de degrés (150 MeV).

Au LHC, on accède à la température maximale atteinte lors d'une collision de noyaux en analysant l'émission de photons par le plasma. Elle est comparable à celle d'un corps noir, et son intensité est proportionnelle à la puissance 4 de la température. On estime ainsi la température maximale du plasma, qui est un record de température produite par l'homme : 4 000 milliards de degrés !

PLS

Quelles sont les autres caractéristiques du plasma que l'on observe ?

F. G. : Le « jet quenching » est un phénomène que nous voyons très bien dans les données. Quand une paire quark-antiquark se forme dans le plasma, les particules s'extraient de celui-ci dans des directions opposées et créent des jets de particules. Si la paire se forme près du bord de la goutte de plasma, l'une des particules traverse une grande distance dans le plasma avant de sortir et perd plus d'énergie en chemin que l'autre. Cette asymétrie, le « jet quenching », peut être mise en évidence en analysant l'énergie des jets.

Ce phénomène est spécifique au plasma quarks-gluons et ne s'observe pas dans une collision proton-proton. Un autre effet caractéristique de la production d'un plasma est celui de la corrélation entre les angles d'émission des particules. La distribution angulaire dépend de la façon dont les noyaux sont entrés en collision : un léger décalage se répercute sur les corrélations entre les directions des particules émises. Cette observation dans des collisions proton-noyau au LHC a permis de conclure que l'on a peut-être formé des gouttes de plasma quarks-gluons malgré une zone d'interaction bien plus petite.

PLS

C'était une surprise ?

F. G. : Il y a quelques années, nous pensions que ces collisions ne formeraient pas de plasma. Or en 2013, au LHC, nous avons observé dans ces collisions proton-noyau des signatures similaires à celles que l'on attribue au plasma quarks-gluons. Sur cet état de la matière, nous avons encore beaucoup à apprendre !

Propos recueillis par Sean BAILLY

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Vers la reconstruction de la moelle épinière

Alain Privat et Florence Perrin

La rééducation n'est plus l'unique horizon des personnes paralysées. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi une moelle épinière lésée ne se répare pas spontanément et l'on sait mieux comment favoriser sa régénération.

En octobre 2014, Darek Fidyka a fait la une de nombreux médias. Paralysé des membres inférieurs jusqu'à la poitrine à la suite d'une agression au couteau, ce Polonais de 40 ans a recouvré un usage partiel de ses jambes après une transplantation de cellules dans la lésion de sa moelle épinière. Pawel Tabakow, de l'université médicale de Wrocław, et ses collègues ont ôté la cicatrice qui s'était formée autour de la lésion et ont introduit une population de cellules – des cellules olfactives engainantes – cultivées à partir d'un bulbe olfactif prélevé sur le patient. Après 21 mois d'entraînement intensif, Darek Fidyka a retrouvé des sensations et est à nouveau capable de mouvements volontaires des jambes.

On ne peut être sûr que ce succès soit le fruit de la transplantation : l'homme a suivi un entraînement intensif avant et après l'opération, et chaque étape du protocole opératoire a pu influer sur le résultat. Pour le confirmer, il faudrait une étude clinique sur plusieurs patients, notamment des patients contrôles qui suivraient le même programme, mais sans transplantation. Néanmoins, ces travaux sont révélateurs des progrès réalisés dans la compréhension de la moelle épinière et de ses lésions. Aujourd'hui, la rééducation fonctionnelle n'est plus la seule stratégie envisagée pour traiter ces pathologies. Régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique, les pistes explorées sont nombreuses et prometteuses.

L'ESSENTIEL

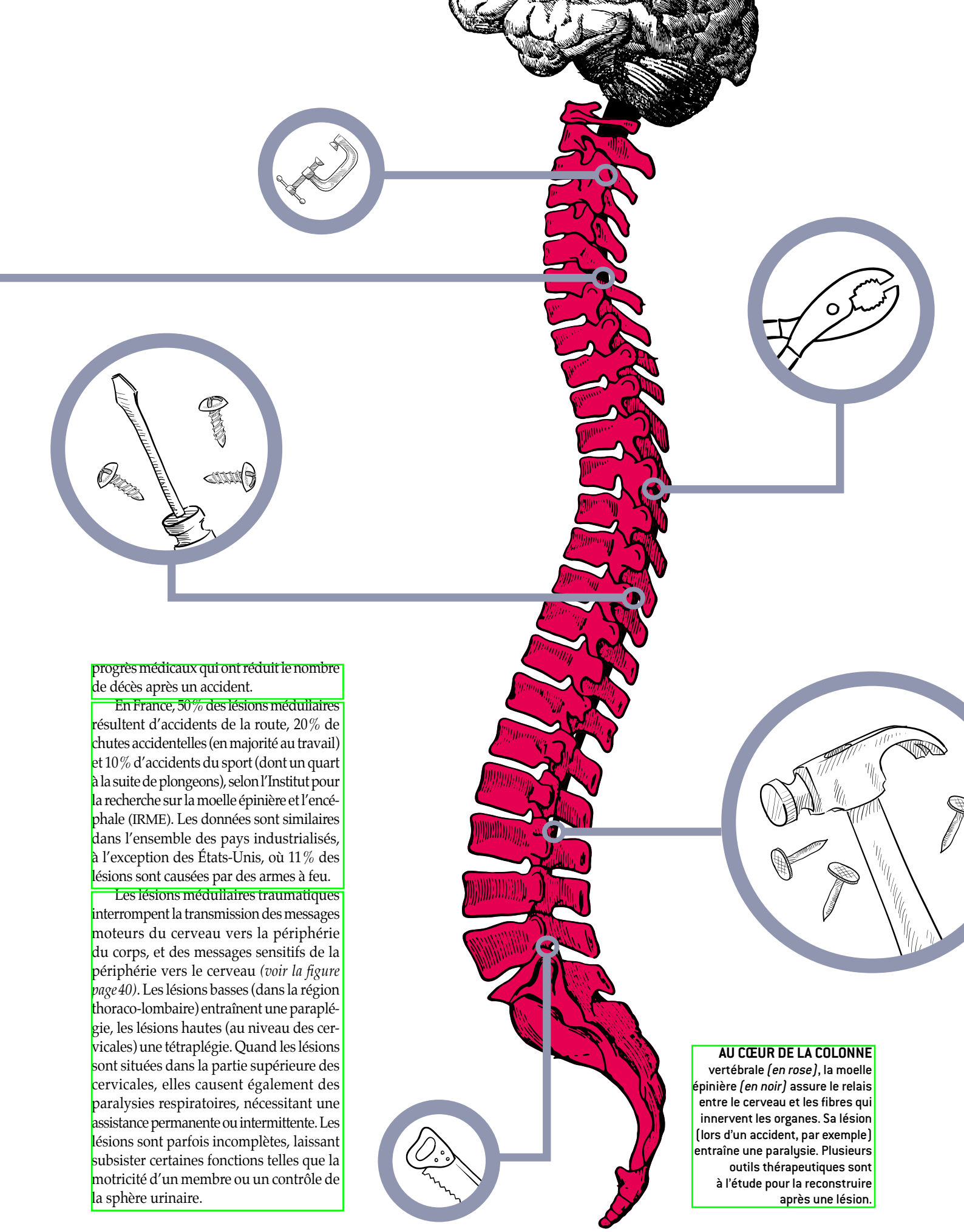
- La France compte 40 000 paraplégiques et tétraplégiques. La plupart de leurs paralysies résultent d'accidents qui ont lésé la moelle épinière.
- On a longtemps cru qu'il était impossible de réparer une moelle épinière abîmée et que le seul traitement possible était la rééducation fonctionnelle.
- Mais depuis une vingtaine d'années, grâce à une meilleure compréhension des mécanismes en jeu, d'autres pistes se dessinent : régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique...

© Shutterstock.com/Morphart Creation/Samantha Grabovac LTF-Graphics

Une lésion sur deux due à un accident de la route

Selon la Haute Autorité de santé, la France compte environ 40 000 paraplégiques et tétraplégiques, respectivement paralysés des membres inférieurs et des quatre membres. En 2013, une étude épidémiologique a répertorié l'ensemble des données publiées entre 1950 et 2012 sur les lésions de la moelle épinière (dites médullaires), responsables de telles paralysies dans le monde. Elle évalue le nombre de nouveaux cas par an – l'incidence annuelle de ces lésions – entre 8 (Espagne) et 246 (Chine) par million d'habitants selon les pays (20 en France), et le nombre total de cas répertoriés entre 236 et 1 298 par million (600 en France). L'incidence annuelle varie assez peu depuis un demi-siècle. En revanche, le nombre total de cas augmente régulièrement depuis vingt ans, en raison des

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



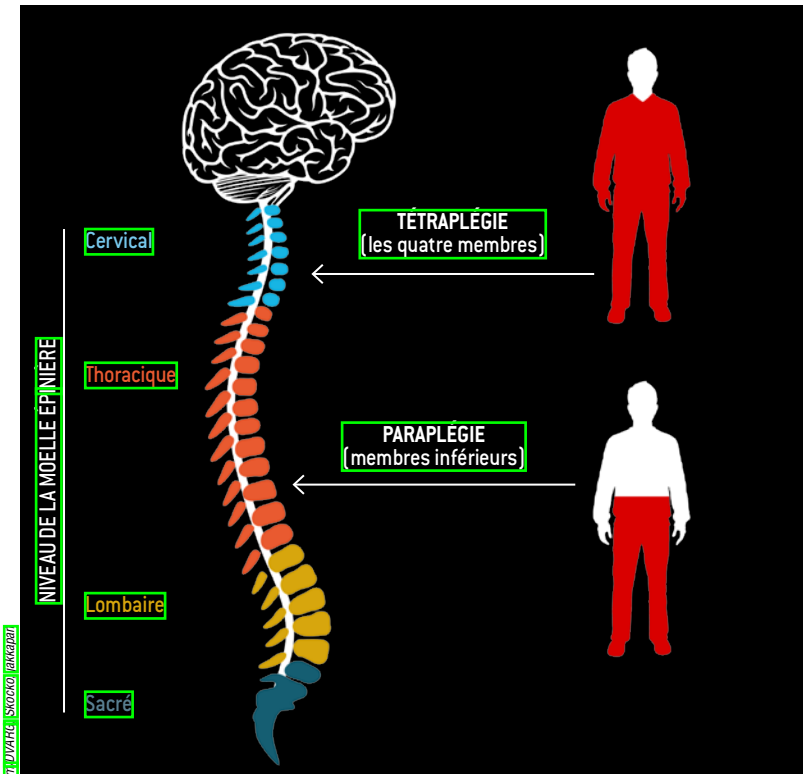
progrès médicaux qui ont réduit le nombre de décès après un accident.

En France, 50 % des lésions médullaires résultent d'accidents de la route, 20 % de chutes accidentelles (en majorité au travail) et 10 % d'accidents du sport (dont un quart à la suite de plongeons), selon l'Institut pour la recherche sur la moelle épinière et l'encéphale (IRME). Les données sont similaires dans l'ensemble des pays industrialisés, à l'exception des États-Unis, où 11 % des lésions sont causées par des armes à feu.

Les lésions médullaires traumatiques interrompent la transmission des messages moteurs du cerveau vers la périphérie du corps, et des messages sensitifs de la périphérie vers le cerveau *(voir la figure page 40)*. Les lésions basses (dans la région thoraco-lombaire) entraînent une paraplégie, les lésions hautes (au niveau des cervicales) une tétraplégie. Quand les lésions sont situées dans la partie supérieure des cervicales, elles causent également des paralysies respiratoires, nécessitant une assistance permanente ou intermittente. Les lésions sont parfois incomplètes, laissant subsister certaines fonctions telles que la motricité d'un membre ou un contrôle de la sphère urinaire.

AU CŒUR DE LA COLONNE vertébrale *(en rose)*, la moelle épinière *(en noir)* assure le relais entre le cerveau et les fibres qui innervent les organes. Sa lésion (lors d'un accident, par exemple) entraîne une paralysie. Plusieurs outils thérapeutiques sont à l'étude pour la reconstruire après une lésion.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



© Shutterstock.com/VIVAHU; SKOCKO; ZIXIQIAN

LES SYMPTÔMES liés à une lésion médullaire dépendent de sa localisation. Plus elle a lieu en position haute, plus ils sont importants, car toutes les fonctions sensorielles et motrices des membres et organes situés en aval sont touchées.

Depuis une vingtaine d'années, les neuroscientifiques comprennent mieux pourquoi ces lésions ne se réparent pas spontanément et plusieurs voies se dessinent pour améliorer la motricité des personnes atteintes, voire les soigner. L'étude des lésions de la moelle épinière a commencé à la fin du XIX^{e} siècle avec les travaux des chirurgiens britanniques William Thorburn et Anthony Bowlby. En 1888, Thorburn s'est intéressé aux conséquences fonctionnelles des lésions cervicales, à l'anatomie des lésions et à l'impact de la chirurgie d'urgence. Bowlby, lui, a étudié en 1890 les modifications des réflexes après une lésion médullaire. On commence à envisager le traitement de ces lésions lors de la Première Guerre mondiale, mais ce n'est qu'en 1945 que le neurochirurgien allemand Ludwig Guttmann pose les bases de leur analyse et des traitements possibles. Pour lui, la chirurgie est inefficace et seule la rééducation fonctionnelle est susceptible d'améliorer le pronostic à long terme.

À l'époque, la thèse dominante était celle que le neurobiologiste espagnol Santiago Ramón y Cajal avait élaborée en 1914 autour du concept de régénération abortive : selon ce concept, après une lésion, la repousse des axones commençait à s'établir, mais ce début se révélait éphémère et inefficace. On pensait donc que le système nerveux central (le cerveau et la moelle épinière) était incapable de se régénérer. Seules deux thérapies étaient alors envisageables : dans une faible mesure, la chirurgie d'urgence décompressive, susceptible d'éviter l'aggravation des lésions (on lève les compressions osseuses afin de réduire les œdèmes qui en résultent) et, surtout, la rééducation fonctionnelle, dont le rôle est d'optimiser les capacités motrices et sensitives à partir des réseaux neuronaux subsistants.

L'importance des cellules gliales

Il a fallu attendre les années 1980 pour que ce dogme vacille. Samuel David et Albert Aguayo, de l'université McGill, à Montréal, ont greffé des nerfs périphériques (innervant les organes, telle la peau) au sein d'une lésion située entre le tronc cérébral et la moelle épinière et montré que le greffon est rapidement colonisé par des prolongements (axones) des neurones adjacents – des neurones du système nerveux central –, sur des distances allant jusqu'à trois centimètres. L'explication donnée par les auteurs, maintes fois confirmée depuis, est le rôle capital de l'environnement tissulaire dans la plasticité du système nerveux central.

Cette découverte essentielle part d'une constatation simple : après section d'un nerf périphérique, une suture soigneuse de l'enveloppe du nerf permet la repousse des fibres sectionnées à partir du segment proximal (le segment de l'axone relié au corps cellulaire). Dans le cadre d'une lésion, les axones du système nerveux central sont capables d'emprunter le greffon du nerf périphérique. Cela signifie que seul l'environnement de ces axones conditionne leur régénération.

Dans le système nerveux central, cet environnement est constitué de cellules dites gliales, dont il existe plusieurs types : les astrocytes, les cellules microgliales et les oligodendrocytes *(voir l'encadré page ci-contre)*. Chaque type cellulaire joue un rôle clef dans le maintien des circuits neuronaux, et chacun modifie son comportement lors d'une lésion.

Les astrocytes sont les cellules nourricières des neurones, auxquels ils fournissent les glucides nécessaires à leur métabolisme.

LES AUTEURS

Alain PRIVAT est directeur de recherche honoraire et membre de l'Académie de médecine.

Florence PERRIN est professeur à l'université de Montpellier et membre du laboratoire Inserm U1051, à l'Institut des neurosciences de Montpellier.

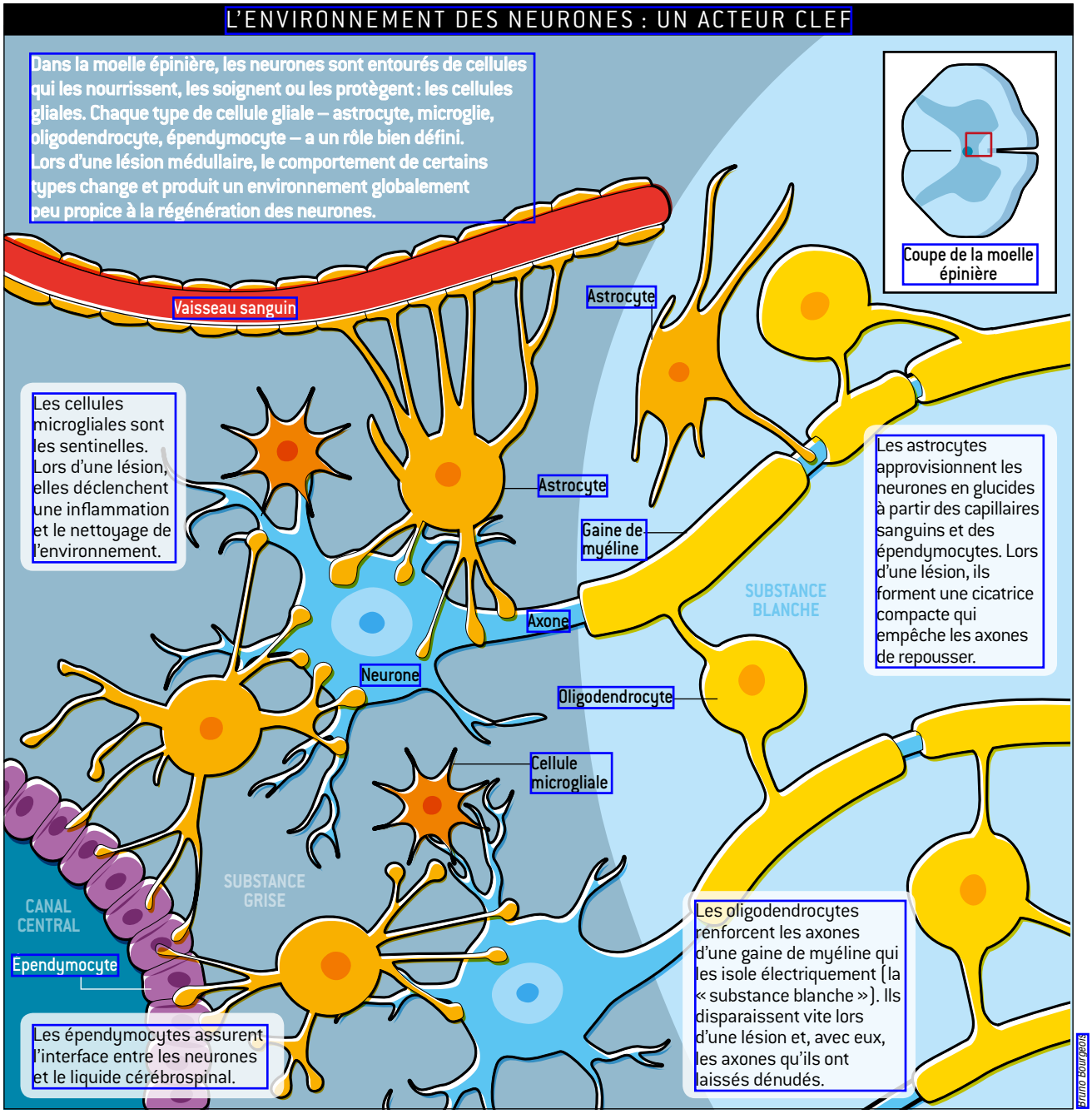
© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

ils réagissent à une lésion en augmentant de volume et en se multipliant, ce qui conduit à la formation d'un tissu cicatriciel compact, imperméable à toute repousse axonale. Les cellules microgliales sont des macrophages, « cellules nettoyeuses » du système nerveux. Elles interviennent dans les premières heures qui suivent le traumatisme en passant d'une forme ramifiée, pourvue de nombreux prolongements courts, à une forme mobile qui leur permet de se déplacer vers le foyer de lésion. Les cellules microgliales sécrètent un vaste éventail de petites molécules, les cytokines, dont certaines déclenchent une inflammation et d'autres, le nettoyage de facteurs inhibiteurs présents dans l'environnement.

Enfin, les oligodendrocytes recouvrent les axones du système nerveux central d'une gaine de myéline (une substance graisseuse) qui les isole électriquement. Ces cellules dégénèrent vite à la suite d'un traumatisme et de la disparition des axones qui s'ensuit. Celles qui restent, à proximité de la lésion, synthétisent une protéine, Nogo. Découverte en 2000 par Martin Schwab de l'université de Zurich, cette protéine est un obstacle à la régénération axonale. Quand on la neutralise avec des anticorps spécifiques, on favorise la repousse axonale. Toutefois, l'efficacité de la stratégie dans un modèle de lésion chez le primate est limitée et les conditions d'administration des anticorps rendent son application en clinique difficile en raison de leur fragilité et de la nécessité de les administrer de façon répétitive au niveau de la lésion.

Ainsi, non seulement la régénération axonale n'est plus exclue, mais l'environnement des axones se révèle jouer un rôle clef dans

L'ENVIRONNEMENT DES NEURONES : UN ACTEUR CLEF



leur plasticité. Dans certaines conditions, il empêche leur régénération, mais dans d'autres, il pourrait la favoriser… Une autre découverte a renforcé cette idée de plasticité neuronale. Longtemps, on a cru qu'aucun nouveau neurone n'était produit dans le système nerveux central des mammifères adultes : on pensait que la neurogenèse adulte était impossible. Mais en 1962, le neurobiologiste américain Joseph Altman a montré qu'une telle neurogenèse adulte a lieu chez le rat, dans une zone située à l'avant du cerveau. Les cellules immatures de cette région migrent vers le bulbe olfactif, où elles se transforment en neurones.

Une deuxième région, l'hippocampe, essentielle à la mémorisation, se révèle également riche en précurseurs neuronaux : en 1982, nous avons montré chez le lapin que ces cellules maturent localement et s'intègrent dans des circuits synaptiques. Dans les années 1990 s'est alors développé le concept de niches prolifératives, c'est-à-dire d'amas très localisés de précurseurs qui deviennent des neurones ; de tels précurseurs ont été découverts chez l'homme dans les mêmes régions. Enfin, en 2008, nous avons mis en évidence une telle niche dans le canal central de la moelle épinière, au niveau lombaire, chez l'homme. Nous avons cultivé des cellules prélevées *post mortem* et certaines se sont différenciées en neurones. Ces cellules ont donc bien le potentiel de se transformer en neurones. Reste à savoir si elles le font de façon spontanée *in situ*…

Régénération axonale et neurogenèse adulte sont ainsi devenues les fondements de stratégies thérapeutiques innovantes dans les pathologies de la moelle épinière. Développées depuis une trentaine d'années, ces stratégies visent à faire traverser la lésion par des axones adjacents à celle-ci, ou à recréer des neurones sous-jacents à la lésion.

Le principal obstacle à la régénération axonale dans la moelle épinière lésée a été révélé par l'expérience de Samuel David et Alberto Aguayo en 1981 : la cicatrice gliale d'astrocytes qui se forme autour de la lésion est si dense qu'elle est imperméable même aux plus petites molécules. Le gonflement et la multiplication des astrocytes conduisent à la mise en place rapide d'une « barrière » au contact de la lésion *(voir les figures pages 44 et 45)*. Elle est constituée des prolongements entremêlés des astrocytes (une barrière du même type entoure et protège le cerveau, la barrière hémato-encéphalique). Ces prolongements sont liés entre eux par des jonctions qui mettent en communication les cellules reliées tout en rendant l'interstice entre elles – et donc la barrière – imperméable à la repousse des axones.

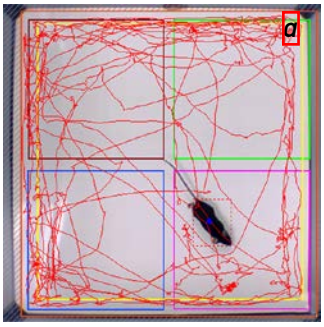
L'examen des astrocytes au microscope électronique montre que les prolongements sont remplis de fins filaments, les gliofilaments, dont la composante principale est une protéine, la protéine gliofibrillaire acide, ou GFAP. Une autre protéine des gliofilaments, la vimentine, présente au

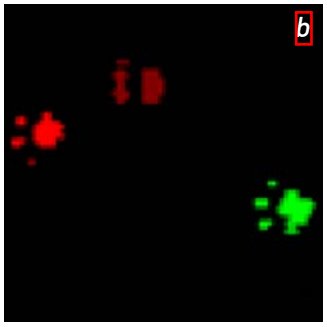
Des méthodes fondées sur l'expérimentation animale

Aucune solution alternative n'existant encore, les modèles animaux sont indispensables non seulement pour comprendre les mécanismes impliqués dans les traumatismes médullaires, mais aussi pour développer des stratégies thérapeutiques. Leurs caractéristiques doivent être les plus proches possibles de celles de l'homme.

De nombreux types de lésions médullaires sont étudiés chez l'animal, tels que des sections, des contusions réalisées à l'aide de la chute contrôlée d'un poids sur la moelle épinière ou des compressions induites par un clip ou un ballon. La majorité des études sont conduites chez des souris ou des rats, mais il faut ensuite valider les résultats obtenus sur des animaux plus proches de l'homme, tels le porc (taille corporelle similaire) et les primates non humains (bipédie, organisation anatomique). En particulier, le faisceau cortico-spinal, qui contrôle la motricité, est assez similaire chez les primates non humains et les hommes ; cette organisation anatomique reflète la capacité de préhension des primates. Ces modèles animaux sont donc plus prédictifs quant à l'issue des stratégies thérapeutiques.

Après avoir lésé la moelle épinière des animaux, on analyse leurs fonctions motrice et sensorielle grâce à des tests comportementaux. Cela permet non seulement de déterminer les symptômes associés à un type de lésion (et inversement), mais surtout d'évaluer l'efficacité des stratégies thérapeutiques. Par exemple, l'enregistrement et l'analyse des mouvements spontanés d'un animal lésé *(a)* et d'un animal lésé ayant reçu une molécule peuvent être comparés pour évaluer l'effet du traitement. En filmant l'animal par en dessous, on visualise et analyse chaque étape de la marche *(b)*. Et on utilise des tapis roulants pour évaluer les capacités physiques des animaux en continu sur un temps donné *(c)*. En général, ces résultats sont comparés aux données histologiques *post mortem* afin d'établir une corrélation entre les symptômes et le degré de lésion médullaire.





Sauf mention contraire de bas de page, son des auteurs

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

cours du développement de l'astrocyte, est réexprimée après une lésion. Ces protéines forment le squelette de l'astrocyte (son cytosquelette) et sont indispensables à l'extension des prolongements qui constituent la cicatrice.

Neutraliser la cicatrice pour faciliter la repousse

Une stratégie thérapeutique consiste alors à neutraliser la cicatrice gliale pour faciliter la repousse axonale. En 1995, chez le rat, l'équipe de l'un d'entre nous (A. Privat) a atténué la réaction des astrocytes à une lésion par un traitement chimique particulier, ce qui a facilité la repousse d'un élément essentiel de la commande motrice, la projection sérotoninergique. Issu d'un noyau du tronc cérébral (le noyau raphé magnus), ce groupe d'axones active un ensemble de neurones de la moelle épinière situé au niveau des lombaires et responsable de la locomotion. L'activation se fait par libération de sérotonine, une molécule dite neurotransmettrice qui active des récepteurs spécifiques à la surface des neurones cibles. Les rats ont retrouvé une motricité réflexe.

Et en 2003, nous avons montré chez la souris qu'en empêchant la formation des prolongements des astrocytes, on favorise le rétablissement de la locomotion : chez des souris dont avaient été inactivées les gènes codant les deux protéines indispensables à leur extension – GFAP et la vimentine –, nous avons lésé une partie de la moelle épinière, ce qui a entraîné la paralysie d'une patte arrière. Les animaux mutants ont retrouvé une locomotion quasi normale en cinq semaines, contrairement aux souris témoins, non mutées. Nous avons répété l'expérience en ne gardant que la mutation du gène de la GFAP, qui s'est révélée suffisante.

Les souris mutantes n'avaient pas de cicatrice gliale et rétablissaient des connexions entre le cerveau et les motoneurones (les neurones de la moelle qui commandent la contraction des muscles) situés au-delà de la lésion, grâce à la repousse des axones sérotoninergiques au contact des neurones adjacents. En nous inspirant de ces résultats, nous avons développé une thérapie génique, pour l'instant chez la souris. Nous avons construit des fragments d'ARN dits interférents qui inhibent l'expression du gène de la protéine GFAP et nous les avons insérés dans des virus inactivés, qui ont servi de transporteurs. Injectés à l'animal juste après la lésion et au voisinage immédiat de celle-ci, ces ARN ainsi encapsulés ont fourni des résultats similaires à ceux obtenus chez les souris transgéniques : la fonction locomotrice a été partiellement rétablie et les axones sérotoninergiques ont repoussé, dressant un pont sur la lésion. Avant d'envisager cette thérapie génique chez l'homme, il s'agit à présent de la tester chez des primates non humains.

La cicatrice gliale n'est pas le seul obstacle à la repousse neuronale dû aux astrocytes. Ces derniers sécrètent et relâchent entre les cellules des polyglycanes – des molécules qui freinent la régénération axonale. Or une enzyme, la chondroïtinase, décompose ces glycanes. En 2014, Katalin Bartus, du King's College de Londres, et ses collègues ont montré que l'injection de cette enzyme à des rats blessés favorise la repousse des

On analyse aussi l'ensemble des modifications moléculaires déclenchées par la lésion, près d'elle ou à distance. Par exemple, les changements de forme des astrocytes et des cellules microgliales s'accompagnent de la production d'un grand nombre de molécules, bénéfiques ou néfastes pour la repousse axonale selon le délai écoulé depuis la lésion, la localisation de la cellule par rapport à celle-ci et le type de lésion. *In fine*, la repousse des axones dépend de l'équilibre entre les molécules qui l'inhibent et les molécules qui la favorisent.

Jusqu'à il y a environ une dizaine d'années, on manquait d'outils précis pour suivre l'évolution des traumatismes médullaires chez l'animal. L'imagerie par résonance magnétique (IRM), seul outil permettant un tel suivi chez l'homme, n'était pas adaptée aux petits animaux. Des appareils appropriés ont été développés il y a peu ; ils devraient permettre d'établir des fenêtres de correspondance, c'est-à-dire des temps post-lésionnels où les images obtenues chez l'animal et chez l'homme se ressemblent. Ce qui devrait aider à définir des fenêtres thérapeutiques chez l'homme.

Recherche animale et éthique

L'expérimentation animale est réglementée depuis 1986. De plus, depuis 2013 :

- **Aucun projet scientifique ne peut être mis en œuvre sans autorisation préalable du ministère de la Recherche.**
- **L'autorisation du projet est soumise à l'évaluation d'un comité d'éthique qui jauge la balance entre contraintes imposées aux animaux et bénéfice pour la santé.**
- **Les procédures sont réalisées par des personnes ayant suivi une formation spéciale à l'éthique et aux bonnes pratiques appliquées aux espèces utilisées.**
- **Elles sont réalisées dans un établissement agréé disposant d'une cellule de bien-être animal qui surveille les conditions de réalisation des procédures.**
- **La conformité des projets et établissements et les compétences sont vérifiées par les inspecteurs vétérinaires des Directions départementales de la protection des populations, qui inspectent les établissements de façon inopinée.**

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

axones. Toutefois, cette enzyme se dégrade vite et doit être injectée localement de façon répétée, ce qui peut favoriser la survenue d'infections. En conséquence, on ne peut pas l'utiliser chez l'homme pour l'instant.

Les autres pistes pour favoriser la régénération neuronale après une lésion sont pharmacologiques et visent chaque étape clef de cette reconstruction. Certaines, dites neuroprotectrices, concernent la phase précoce des lésions : il s'agit de prévenir l'extension des lésions à partir d'un foyer initial, car cette propagation se manifeste par un important œdème et la libération de substances toxiques qui empêchent la régénération neuronale. D'autres études visent à stimuler la repousse neuronale. D'autres, enfin, cherchent à rétablir une locomotion en agissant directement sur les axones sérotoninergiques.

Empêcher la lésion de s'étendre

Plusieurs molécules ont produit des résultats prometteurs chez l'animal et sont à présent testées lors d'essais cliniques. Toutefois, les essais chez l'homme sont encore peu concluants. Le premier essai clinique de thérapie neuroprotectrice portait sur un corticoïde, la méthylprednisolone. Intitulé NASCIS *(National Acute Spinal Cord Injury Study)*, il a été effectué en trois étapes aux États-Unis, entre 1984 et 1998. Toutefois, la molécule n'a pas eu d'effet significatif et les patients traités ont souffert d'infections respiratoires. Par ailleurs, les conditions techniques de l'interprétation des résultats furent l'objet de nombreuses critiques.

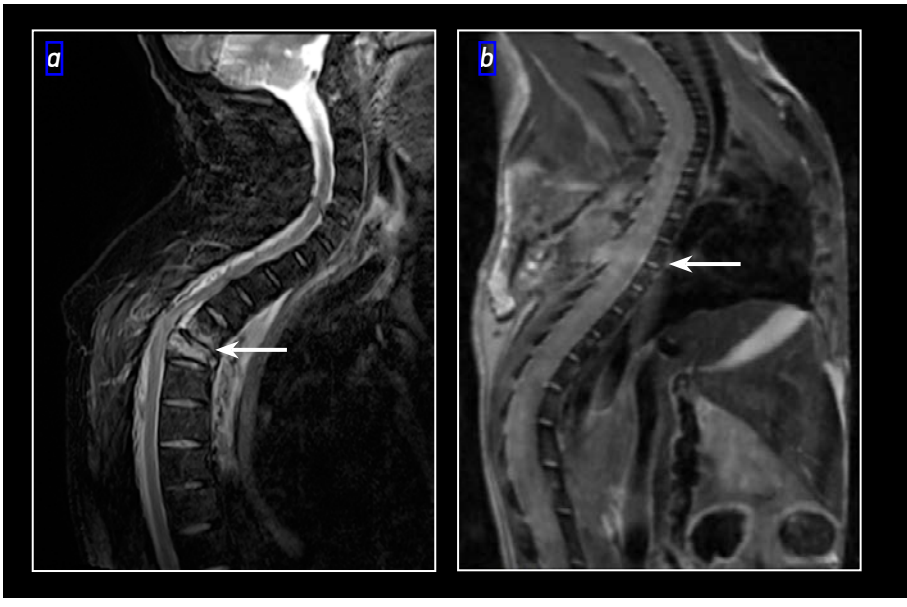
À la fin des années 1990, Vincent Pointillart, de l'hôpital Pellegrin, à Bordeaux, et ses collègues ont aussi testé cette molécule chez l'homme, sans plus de succès. L'équipe a aussi testé un autre traitement – la nimodipine – qui s'est révélé tout aussi inefficace. La nimodipine bloque les canaux perméables au calcium. Les chercheurs espéraient ainsi empêcher l'entrée massive de calcium, toxique pour les cellules, dans les neurones au voisinage de la lésion.

Toute lésion du système nerveux central entraîne une importante libération d'un neurotransmetteur excitateur, le glutamate. Celui-ci se fixe alors sur ses récepteurs à la surface des neurones, ce qui entraîne une entrée massive de calcium qui fait exploser la cellule. Libéré *de facto*, le glutamate se fixe sur les récepteurs d'autres neurones, et la lésion s'étend ainsi de proche en proche. Au début des années 2000, Marc Tadié, du CHU de Bicêtre, et ses collègues ont donc essayé d'agir en amont de l'entrée massive de calcium. Sur plus de 300 accidentés, ils ont testé une molécule, la gacyclidine, qui bloque le fonctionnement des récepteurs du glutamate responsables de la neurotoxicité, les récepteurs NMDA. Ils espéraient ainsi stopper la progression des lésions secondaires. Toutefois, après une amélioration au cours des premiers mois plus rapide que dans le groupe témoin, le bilan à un an ne montra pas d'amélioration significative, sauf pour les traumatismes cervicaux.

Enfin, l'hormone TRH, dotée de propriétés antioxydantes, a été testée sur un petit nombre de patients au début des années 1990, sans effet significatif. Il s'agissait ici de contrer la libération toxique de radicaux libres superoxydes qui se produit au cours d'une lésion médullaire. Instables, ces molécules dérivées de l'oxygène se stabilisent en captant ou cédant un électron aux molécules de leur entourage, propageant ainsi l'instabilité et causant divers dégâts dans les cellules et les tissus.

Les études visant à stimuler la repousse axonale sont elles aussi peu concluantes chez l'homme. Le ganglioside GM1, un lipide complexe qui aurait des effets neuroprotecteurs, a fait l'objet d'un vaste essai aux États-Unis, sans résultat notable. Enfin, la cethrine, un antagoniste de la protéine rho, inhibiteur de la repousse axonale, a fait l'objet d'un essai préliminaire sur une quarantaine de patients et, comme avec la gacyclidine, une légère amélioration a été obtenue dans le sous-groupe des lésions cervicales. Un essai de phase III sur un plus grand nombre de patients est envisagé.

Les recherches sur les axones sérotoninergiques sont prometteuses. En 1986, l'un de nous (A. Privat) a montré que la greffe de neurones sérotoninergiques immatures en aval d'une section complète de la moelle épinière peut rétablir une locomotion réflexe chez le rat. Depuis, la récupération d'une locomotion volontaire a été corrélée à la repousse des axones sérotoninergiques dans de très nombreux modèles de lésions traités par des techniques variées. Ces résultats suggèrent que la sérotonine, le neurotransmetteur libéré par ces axones vers les motoneurones du réseau locomoteur spinal, le centre qui contrôle de façon autonome la locomotion, pourrait être une cible pour des stratégies thérapeutiques pharmacologiques. Il s'agirait, par exemple, d'utiliser des composés agonistes des récepteurs de la sérotonine, c'est-à-dire qui activeraient ces récepteurs à la place de la sérotonine qui ne peut plus rejoindre les motoneurones en cas de lésion. En 2010, une étude canadienne a montré que lors d'une lésion, après quelque temps, certains de ces récepteurs se remettent à s'activer même en l'absence de sérotonine (incontrôlées, ces activations causent parfois des spasmes musculaires involontaires). Des agonistes pharmacologiques ciblés sur



© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

certains motoneurones (à l'aide de mini-pompes locales, par exemple) aideraient peut-être à renforcer cette activation.

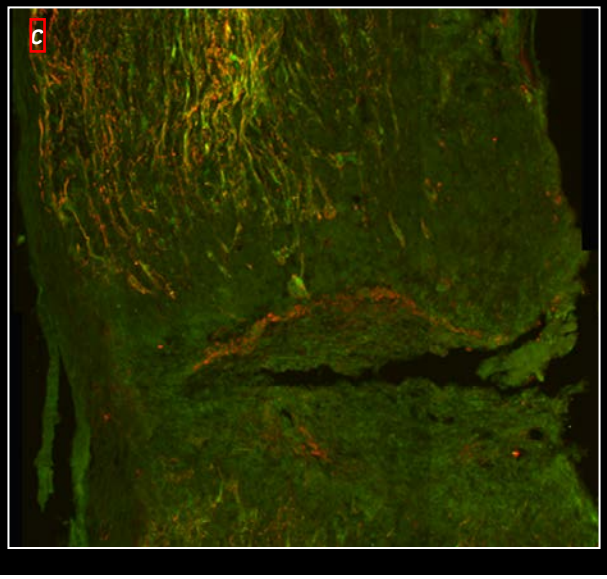
Transplanter des cellules souches

L'autre grand axe de recherche pour reconstruire la moelle épinière consiste en la transplantation de cellules immatures dans la moelle épinière lésée, afin de remplacer les neurones détruits et leurs cellules nourricières. Dès 1999, la transplantation de cellules souches embryonnaires a été testée chez l'animal, avec des résultats encourageants : les animaux transplantés après une lésion médullaire récupéraient une certaine motricité. Toutefois, ces transplantations produisaient des effets secondaires gênants. Diverses études similaires chez l'animal et chez l'homme ont causé soit une survenue plus fréquente de douleurs chroniques, probablement due à une réorganisation anormale de la moelle épinière, soit une aggravation des symptômes neurologiques tels que la spasticité (la contraction involontaire des muscles) et l'hyperalgie (la perception exacerbée de la douleur). En 2010, cependant, nous avons transplanté à des rats paraplégiques des précurseurs neuraux embryonnaires humains sans aggraver leurs symptômes : nous avons modifié génétiquement ces précurseurs pour qu'ils produisent un facteur favorisant la croissance neuronale, la neurogénine 2 (habituellement, le gène de ce facteur n'est exprimé qu'une fois que les cellules se sont différenciées). Qu'ils aient reçu la version modifiée ou non des précurseurs, les rats ont amélioré leur motricité – et ce, d'autant plus dans le cas des cellules modifiées. Mais seuls les rats avec la version modifiée n'ont pas eu d'aggravation des symptômes sensoriels.

La première tentative de transplantation cellulaire chez l'homme a été décevante. Débuté fin 2010, l'essai clinique, réalisé par la société américaine Geron, s'est arrêté un an plus tard faute d'indices d'une quelconque efficacité, alors que seuls quatre des huit patients prévus avaient reçu l'injection de cellules souches embryonnaires. Mais un autre essai clinique actuellement en cours semble plus prometteur. StemCells, une société californienne, l'a démarré en 2011 à Zurich afin de tester l'efficacité et l'absence d'effets secondaires de la transplantation de cellules souches neurales. En février 2013, StemCells a annoncé que deux des trois patients traités présentaient une amélioration un an après le traitement. Depuis, une douzaine de patients au total ont été traités dans le cadre de l'essai, dont les résultats ont été divulgués en mai dernier ; non seulement tous les patients ont bien toléré la transplantation, mais plus de la moitié ont retrouvé des fonctions sensitives dès le troisième mois après la transplantation. Ces améliorations ont perduré jusqu'à la fin de l'étude, un an plus tard. Le traitement est à présent en essai clinique de phase II.

Les autres pistes de traitement par thérapie cellulaire sont l'utilisation des cellules immatures des niches prolifératives déjà évoquées (le bulbe olfactif, par exemple), et surtout l'activation des cellules de la niche présente dans la moelle épinière. Par ailleurs, les cellules souches pluripotentes induites (iPS) constituent une alternative intéressante. Contrairement aux cellules souches embryonnaires, ce sont des cellules adultes différenciées, dont la faculté de former divers types cellulaires a été réactivée *in vitro*. Elles peuvent être prélevées et réimplantées chez le même patient et ne posent donc ni problème de rejet ni problème éthique lié à l'utilisation des cellules embryonnaires. Les études précliniques sont prometteuses. La transplantation cellulaire agirait d'ailleurs plus en produisant un environnement favorable à la régénération des axones des neurones encore présents qu'en remplaçant les cellules endommagées. Cependant, de nombreuses questions restent en suspens. Quelles cellules greffer ? Quand le faire ? Il est primordial, pour des patients qui ont une espérance de vie normale, de contrôler la prolifération, la différenciation et le devenir à long terme des cellules greffées, afin d'éviter l'aggravation des symptômes, en particulier des douleurs neuropathiques.

Actuellement, la rééducation fonctionnelle (kinésithérapie et ergothérapie si la lésion est incomplète, mobilisation passive si elle est complète) reste la principale thérapie utilisée. La chirurgie de décompression a



LORS D'UNE LÉSION de la moelle épinière (*a*, *b*, IRM d'une lésion médullaire thoracique respectivement chez l'homme et la souris), les cellules nourricières des neurones – les astrocytes –, jusqu'alors réparties dans la moelle, se multiplient et s'amassent autour de la lésion (*c, chez la souris, une semaine après la lésion, en rouge, vert et jaune*). Quatre semaines après la lésion, elles forment une cicatrice gliale compacte de part et d'autre de la lésion (*d*). La moelle épinière humaine a une largeur d'environ 1,2 cm (2,5 mm chez la souris).

© Marek Muszalski/Demotix/Corbis

GRÂCE À SON COSTUME BIONIQUE, Claire Lomas est devenue, en mai 2013, la première femme paraplégique à finir le marathon de Londres (en 16 jours). L'utilisation de ces exosquelettes est autorisée en Grande-Bretagne depuis 2012 et a récemment été approuvée par l'Agence américaine des aliments et des médicaments. En Europe, le premier exosquelette développé, *Hercule*, est français (société RB3D). Il devrait avoir un usage tant militaire que civil, notamment médical.

aussi fait la preuve de son efficacité lorsqu'elle est pratiquée dans les dix heures suivant la lésion. La rééducation fonctionnelle intervient alors pour optimiser les fonctions résiduelles, réduire la masse graisseuse, limiter la fonte musculaire. En 2014, Naaz Kapadia, de l'Institut de réhabilitation de Toronto, et ses collègues ont montré que l'association de cette rééducation avec une stimulation électrique améliore les performances, surtout si la lésion est incomplète. L'association active probablement des circuits « dormants », inactifs en temps normal.

Enfin, en 2013, Heather Hayes, de l'université Emory, à Atlanta, a prouvé l'efficacité d'une forme de rééducation inédite, l'hypoxie transitoire, qui consiste à retenir sa respiration pendant quelques dizaines de secondes. Là aussi, des circuits dormants seraient activés lors du stress induit.

Bientôt des neuroprothèses ?

Divers dispositifs robotiques sont aussi à l'étude pour restaurer une autonomie aux patients. Les premiers exosquelettes ont vu le jour dans les années 1960 dans le cadre du projet *Hardiman*, issu de la collaboration de General Electric avec l'armée américaine. Ce projet a été arrêté, car le poids des exosquelettes (700 kg) les rendait inutilisables, mais il a posé les bases des costumes bioniques actuels. Constitués d'attelles mécaniques aux articulations motorisées, ces derniers s'enfilent comme un harnais. Une série de capteurs détectent les mouvements du buste et des bras, puis les transmettent à un ordinateur localisé dans le dos de l'utilisateur. L'ordinateur calcule ensuite les mouvements correspondants des jambes, puis actionne les articulations mécaniques et commande ainsi la marche. Des béquilles sont utilisées pour plus de stabilité *(voir la figure ci-contre)*.

Malgré leur potentiel, ces exosquelettes ne sont pas adaptés à tous les patients. Bien que leur coût baisse, ils demeurent onéreux (plus de 50 000 euros), lourds (plus de 20 kg) et d'autonomie restreinte (quelques heures). En outre, leur utilisation nécessite un long apprentissage et, surtout, une certaine force dans le buste et les bras. Ils ne conviennent donc pas aux tétraplégiques.

Pour ces derniers, un espoir réside dans les interfaces cerveau-machine, qui visent à contrôler des prothèses par la pensée. Les activités électriques des neurones sont enregistrées avec une grande résolution temporelle et spatiale grâce à une grille d'électrodes implantée sur le cortex moteur, à la surface du cerveau. Lorsque le sujet essaie mentalement de bouger ses bras ou ses mains, il active les neurones qui contrôlent ces mouvements. Les électrodes captent cette activité électrique et la transmettent à un ordinateur, qui la décode puis envoie les commandes motrices correspondantes aux prothèses. Une variante consiste à envoyer ces commandes à un dispositif de stimulation électrique connecté aux muscles du paralysé.

En 2008, l'équipe d'Andrew Schwartz, de l'université de Pittsburgh, a ainsi permis à un macaque de contrôler par la pensée un bras robotisé. L'animal a pu tourner une poignée de porte puis attraper et manger des guimauves. En 2012, Christian Ethier, de l'université Northwestern, à Chicago, et ses collègues ont restauré la motricité fine d'un bras paralysé chez un singe, qui a réussi à attraper une balle. La même année, l'équipe d'Andrew Schwartz a implanté une grille d'électrodes dans le cortex moteur d'une femme tétraplégique de 52 ans : elle est maintenant capable de contrôler un bras artificiel et d'attraper des objets avec la main de la prothèse. En 2013, un deuxième patient tétraplégique de 30 ans a bénéficié du même type d'implantation et a pu contrôler le mouvement d'une main artificielle.

L'application clinique à grande échelle de cette technique ne sera pas immédiate. Le contrôle de neuroprothèses par la pensée est une technique invasive qui, pour l'instant, ne donne des résultats qu'en laboratoire et avec l'aide de bon nombre d'ingénieurs et de chercheurs. Néanmoins, ces travaux constituent une étape importante dans l'utilisation d'implants bioniques.

Ainsi, l'avenir de la prise en charge des blessés médullaires est sans doute à la mise en œuvre séquentielle d'une série de mesures thérapeutiques allant de la neuroprotection à l'utilisation d'implants bioniques, centrée sur la stimulation et le contrôle d'une régénération neurale intrinsèque. La compréhension du fonctionnement de la moelle épinière éclaire aussi d'autres domaines des neurosciences. Partie intégrante du système nerveux central, la moelle épinière constitue désormais un modèle pour tester de nouvelles thérapies applicables à d'autres pathologies du cerveau adulte, telles que les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson. Dans ces pathologies aussi, des modifications des cellules gliales participent à la mort des neurones… ■

BIBLIOGRAPHIE

H. N. Noristani *et al.*, **Correlation of *in vivo* and *ex vivo* ^{1}H-MRI with histology in two severities of mouse spinal cord injury**, *Front Neuroanat.*, vol. 9, art. 24, 5 mars 2015.

U. Sławińska *et al.*, **The role of serotonin in the control of locomotor movements and strategies for restoring locomotion after spinal cord injury**, *Acta Neurobiol. Exp. (Wars)*, vol. 74, pp. 172-187, 2014.

J. C. Furlan *et al.*, **Global incidence and prevalence of traumatic spinal cord injury**, *Can. J. Neurol. Sci.*, vol. 40, pp. 456-464, 2013.

S. David et A. J. Aguayo, **Axonal elongation into peripheral nervous system « bridges » after central nervous system injury in adult rats**, *Science*, vol. 214, pp. 931-933, 1981.

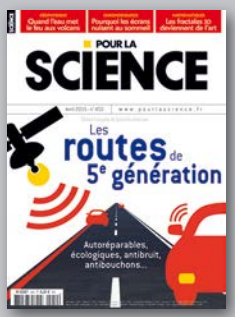
© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

N°454 – août 2015
❑ réf. M0770454

N°453 – juillet 2015
❑ réf. M0770453

N°452 – juin 2015
❑ réf. M0770452

N°451 – mai 2015
❑ réf. M0770451



N°450 – avril 2015
❑ réf. M0770450

N°449 – mars 2015
❑ réf. M0770449

N°448 – février 2015
❑ réf. M0770448

N°447 – janvier 2015
❑ réf. M0770447

N°446 – décembre 2014
❑ réf. M0770446

N°445 – novembre 2014
❑ réf. M0770445

N°444 – octobre 2014
❑ réf. M0770444

N°443 – septembre 2014
❑ réf. M0770443

N°442 – août 2014
❑ réf. M0770442

N°441 – juillet 2014
❑ réf. M0770441

N°440 – juin 2014
❑ réf. M0770440

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection dès maintenant !

5,50€ dès le 2e numéro acheté !

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ **Oui, je commande des numéros de *Pour la Science* au tarif unitaire de 5,50€ dès le 2e acheté.**

Je reporte ci-dessous les références à 6 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format souhaité :

1re réf.	0 1	× 6,50 € =	6,50 €
2e réf.		× 5,50 € =	€
3e réf.		× 5,50 € =	€
4e réf.		× 5,50 € =	€
5e réf.		× 5,50 € =	€
6e réf.		× 5,50 € =	€
Frais port (4,90€ France – 12€ étranger)		+	€

Je commande la reliure *Pour la Science* (capacité 12 nos) au prix de **14 €** + €

TOTAL À RÉGLER = €

J'indique mes coordonnées :

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. : Ville :

Pays : Tél. : (Pour le suivi client facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science** :

@

* à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ par carte bancaire

N°

Date d'expiration Code de sécurité (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ❑.**

VPPLS455 Offre valable jusqu'au 30/09/15 dans la limite des stocks disponibles

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

Steven Miller

Day Night Band le veilleur de nuit

Un satellite américain d'observation lancé en 2011 embarque un capteur d'une sensibilité inédite à la lumière du domaine visible. Ses données recueillies la nuit ouvrent de nouveaux horizons aux météorologistes, aux pompiers, aux services de secours et aux scientifiques.

CETTE VUE NOCTURNE de la Terre cumule deux mois d'images prises par le capteur *Day Night Band* dont est équipé le satellite américain *Suomi* NPP.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Lorsque la nuit tombe sur une région donnée, les scientifiques se voient brutalement dépourvus d'images satellitaires dans le domaine de la lumière visible. Or ces images pourraient révéler de grandes tempêtes, la fumée d'incendies de forêts, des blocs de glace de mer dangereux pour les navires, etc. Heureusement, un nouveau capteur opérant sur le canal nommé DNB (*Day Night Band*, « Canal jour et nuit »), opérant entre 0,5 et 0,9 micromètre de longueur d'onde, commence à combler ce vide.

Faisant partie du système d'imagerie visible et infrarouge VIIRS embarqué sur le satellite américain *Suomi* NPP, l'instrument est sensible au point de détecter la lueur d'un simple lampadaire de rue ou celle du pont d'un bateau isolé au milieu de l'océan. Même lors d'une nuit sans lune, le capteur peut discerner des nuages et des étendues de neige, éclairés par la faible luminescence nocturne de l'atmosphère.

Depuis le lancement de *Suomi* NPP, en 2011, les chercheurs ont pu observer de fascinants phénomènes atmosphériques liés à des orages violents. Ils ont également aidé à prévoir la trajectoire des cyclones, à suivre les panaches de fumée d'incendies et à diriger hors des zones de banquise les bateaux égarés *(voir les images pages suivantes)*.

Le capteur DNB complète aussi les capteurs infrarouges, qui ont du mal à identifier les nuages bas et la couverture de neige, lesquels tendent à se confondre avec leur environnement la nuit. En outre, les scientifiques commencent à fusionner les données du canal DNB avec un logiciel calculant la luminosité de la lune en fonction du temps, ce qui les aide à déterminer la réflectance des nuages, et donc leur contenu en eau. Cette information permet aux météorologues de prévoir l'influence des nuages sur les températures nocturnes au sol et d'aider les pilotes à éviter les conditions de givrage dangereuses pour les avions. Les données améliorent aussi les prévisions météorologiques pour les hautes latitudes, où la nuit dure plusieurs mois.

Un seul capteur *Day Night Band* est en service aujourd'hui. Exploité par l'Agence océanographique et météorologique américaine (la NOAA), *Suomi* NPP est en orbite polaire à une altitude de 832 kilomètres. Il survole chaque région donnée vers 13 h 30 puis vers 01 h 30, en heure locale.

Si de tels capteurs étaient intégrés sur des satellites géostationnaires, les scientifiques pourraient enregistrer des animations continues plutôt que des clichés instantanés. Une plateforme possible pour cette vision nocturne est une future série de satellites géostationnaires GOES *(Geostationary Operational Environmental Satellites)*, dont le lancement est prévu par la NOAA dans les années 2030. S'ils embarquent un capteur tel que *Day Night Band*, on pourra suivre tout au long de la nuit les nuages, les marées noires, les incendies, les fumées, les tempêtes de poussières, les volcans, etc. On pourra aussi suivre les bateaux de pêche naviguant illégalement dans des eaux réglementées et aider à localiser l'épave d'un avion disparu des radars.

L'AUTEUR

Steven D. MILLER
est chercheur à l'Institut coopératif de recherche atmosphérique de l'université d'État du Colorado, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

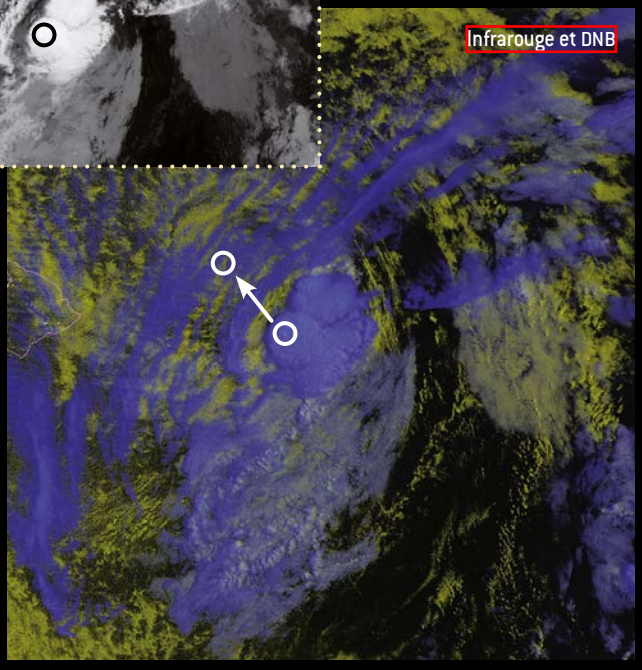
S. D. Miller *et al.*, **Illuminating the capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band**, *Remote Sensing*, vol. 5(12), pp. 6717-6766, 2013.

M. Carlowicz, **Out of the blue and into the black : New views of the Earth at night**, Nasa Earth Observatory, publié en ligne le 5 décembre 2012 : http://earthobservatory.nasa.gov/Features/IntotheBlack

L'ESSENTIEL

- **Un nouveau capteur embarqué sur le satellite *Suomi* NPP détecte des lumières au sol beaucoup plus faibles que ne pouvaient le faire les capteurs précédents.**
- **Grâce à l'infime lueur émise par l'atmosphère, l'instrument peut aussi discerner des nuages, de la neige et d'autres éléments qu'une nuit sans lune cache.**
- **Il aide ainsi à détecter et à suivre des éléments presque invisibles de nuit, tels les cyclones, la fumée d'incendies de forêts ou des navires égarés en mer.**

© Image satellitaire composite Nasa, Earth Observatory



Chasseur de cyclones

Connaître la position exacte de l'œil d'un cyclone est crucial, car les vents les plus intenses et les marées de tempête les plus puissantes se produisent juste autour de lui. Un suivi plus précis de la trajectoire peut sauver des vies, orienter les décisions prises par les services d'urgence concernant les évacuations et économiser des millions en optimisant le déploiement des secours et de l'assistance aux personnes touchées.

Le 28 juillet 2013, le cyclone Flossie s'abattait sur l'île de Hawaii. Les météorologues suivaient son déplacement de près, mais, à la nuit tombée, ils perdirent l'œil de vue. De hauts nuages de type cirrus cachaient aux capteurs infrarouges des satellites le centre de la tempête, situé à plus basse altitude *(image en noir et blanc)*.
À mesure que l'on s'enfonçait dans la nuit, les prévisionnistes craignaient de plus en plus une mauvaise surprise au lever du jour, à savoir que l'œil du cyclone se soit décalé par rapport à la trajectoire prévue, en raison de modifications des vents d'altitude, qui déterminent le déplacement de telles tempêtes.

Heureusement, le satellite équipé du nouveau capteur DNB avait survolé la zone peu avant l'aube. Ses observations à travers la mince couche de nuages d'altitude *(en bleu sur l'image en couleur)* ont montré comment se déplaçait le cyclone, plus proche du sol *(en vert)*. L'imagerie révéla que le centre de la tempête se trouvait plus au nord que prévu *(décalage nord-ouest du petit cercle)*, ce qui représentait une menace moins grande pour l'île. Les prévisionnistes du Service météorologique américain à Honolulu publièrent rapidement, à 5 h 00, un bulletin prévenant les services d'urgence de la nouvelle trajectoire de la tempête, ce qui a évité une évacuation inutile et économisé d'importantes sommes d'argent.

Secours en mer

Le bateau de pêche *Kiska Sea* est un membre américain de la flotte de pêche aux crabes de la mer de Béring. En février 2014, de puissants vents du nord ont soufflé sur le centre de la mer de Béring, ce qui a poussé des blocs de glace de mer vers une région où la flotte avait déployé des casiers à crabes.

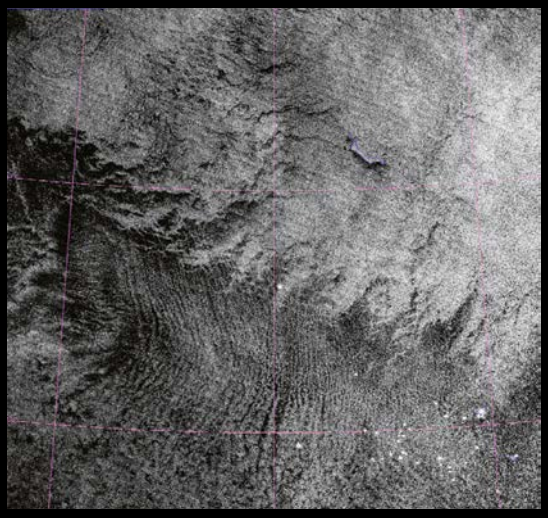
Le 10 février, l'équipage du *Kiska Sea*, le vaisseau situé le plus au nord à ce moment, contacta le service météorologique basé à Anchorage, en Alaska, pour demander quelle était la situation de la glace proche de sa ligne de 150 casiers, chacun gros comme un lit double.
Le service météo confirma que la glace allait encercler la zone. Le *Kiska Sea* se mit en route afin de récupérer les pièges, tout en gardant le contact avec les prévisionnistes. Mais le 13 février, le vaisseau se retrouva encerclé par la glace. Afin d'éviter de chavirer ou d'être écrasé, le *Kiska Sea* devait sortir rapidement de la zone, mais la courte durée du jour et la nuit sans lune ont rendu la navigation périlleuse.

Le service météo utilisa les données du capteur DNB pour repérer les lumières du bateau et pointer avec précision sa position *(point blanc au centre de l'image à droite ; d'autres bateaux sont visibles dans le coin droit en bas)*. Le

Voir à travers l'écran de fumée

Les incendies sont en augmentation dans l'ouest des États-Unis, en partie à cause de sécheresses pluri-annuelles. Les pompiers qui combattent ces violents incendies durant la journée perdent souvent du terrain durant la nuit, lorsqu'il est difficile de suivre les fumées dangereuses et les lignes de feu obscurcies par la fumée. Les incendies de forêts créent aussi parfois de forts vents déviants qui modifient la vitesse et la direction des flammes, mettant soudainement les pompiers en danger. La température de la fumée refroidit rapidement au niveau de celle de l'atmosphère environnante, ce qui rend ces panaches de petites particules presque invisibles aux capteurs infrarouges du satellite la nuit. Souvent aussi, les capteurs ne détectent pas de petites poussées d'embrasement le long des lignes de feu.

© Jeff Turner/Getty Images, Boise Interagency Fire Center



capteur a aussi permis de distinguer la limite de la glace de mer *(lignes déchiquetées qui descendent à partir du haut à droite)*, illuminée par la faible lueur atmosphérique. Grâce à ces informations, les équipes du service météo purent aider le navire à tracer une route sûre vers l'ouest-sud-ouest, en dehors de la zone où s'étendait la banquise.

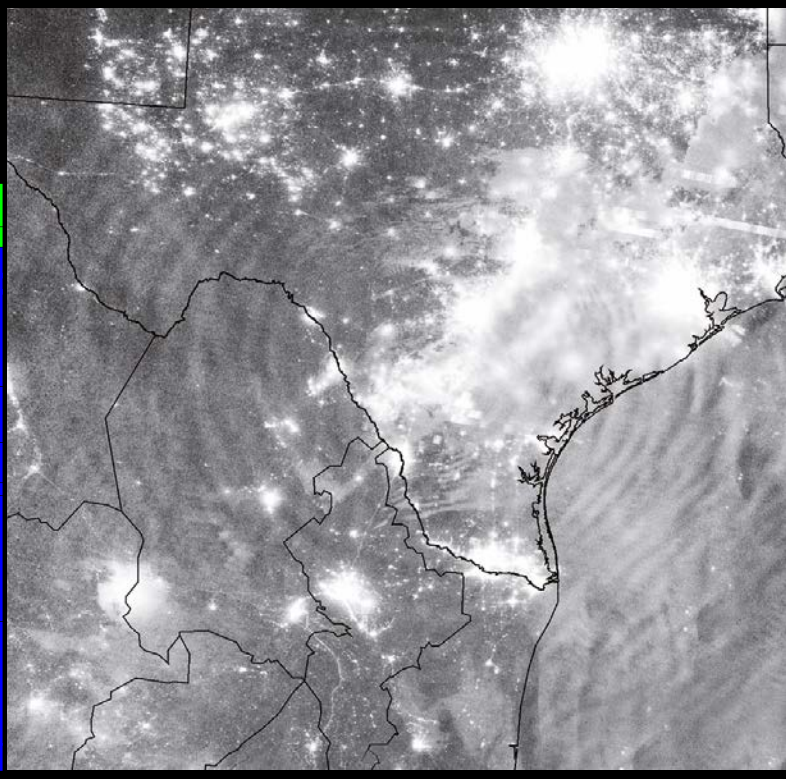
L'incapacité à combattre les flammes la nuit est frustrante, car des températures plus fraîches, une humidité plus élevée et des vents légers constituent des conditions idéales pour les pompiers. Les capteurs de basses lumières peuvent aider, comme on le voit sur les images de l'incendie surnommé Rim Fire de 2013, en Californie. Tout d'abord, lorsque la lumière de la lune est présente, les capteurs montrent clairement des panaches de fumée, ce qui fournit un avertissement fiable aux pompiers *(image de droite ; la fumée n'apparaît pas sur l'image de gauche, prise dans l'infrarouge)*. Les panaches donnent aussi une information précieuse sur les vents proches de la surface, qui attisent les flammes. L'image de droite montre que des vents forts emportent la fumée vers le nord ; les pompiers seraient donc bien avisés d'attaquer le feu sur ses flancs sud.

La lueur du ciel nocturne

Même par une nuit sans lune, loin de toute lumière, on peut voir une vague silhouette de notre main face au ciel « noir ». C'est grâce à la faible lumière émise par des réactions chimiques complexes se déroulant dans la haute atmosphère. Les astronautes de la Station spatiale internationale décrivent régulièrement cette luminescence nocturne, mais sa structure détaillée est restée mal connue.

Les chercheurs travaillant avec les données du capteur DNB ont constaté avec surprise que des structures particulières de luminescence nocturne apparaissaient dans les données recueillies une nuit à proximité d'un orage. L'imagerie a révélé des ondulations caractéristiques dans la lueur. L'énergie libérée au sein des orages engendre des ondes atmosphériques qui se propagent vers le haut. Lorsque, une ou deux heures plus tard, ces ondes atteignent environ 90 kilomètres d'altitude, près du sommet de la mésosphère, elles perturbent la couche émettrice de lumière nocturne, ce qui crée des ondes luminescentes concentriques. Le capteur a enregistré cet effet notamment au cours d'un énorme orage au Texas en 2014 *(ci-dessous)*.

Ces ondes sont plus que des curiosités ; elles transportent de l'énergie qui détermine la circulation atmosphérique à haute altitude. La capacité de DNB à détecter les ondes de luminescence comble une lacune dans les modèles de la dynamique de la haute atmosphère, aidant les chercheurs à mieux prévoir le temps et à comprendre le changement climatique. Des observations au sol ont par ailleurs établi un lien entre les ondes de luminescence nocturne et de grands tremblements de terre, notamment celui auquel était dû le tsunami dévastateur de 2011 au Japon. Il apparaît que le mouvement sismique crée des ondes de pression qui se propagent vers le haut de l'atmosphère. Il est ainsi possible que les données DNB puissent aider les scientifiques à repérer un tsunami lorsqu'il traverse un océan, en surveillant les ondes atmosphériques se propageant au-dessus de lui.



© William Straka/Université de Wisconsin-Madison ; Institut coopératif d'études météorologiques par satellite

Aux origines de

L'examen aux rayons X d'un fossile de petit poisson cuirassé vieux de 415 millions d'années éclaire l'apparition des premiers animaux vertébrés dotés de mâchoires.

Vincent DUPRET

Lorsqu'on mange une lamproie, on mâche un animal vertébré dépourvu de mâchoires : un cyclostome. Nous autres les gnathostomes, c'est-à-dire les vertébrés à mâchoires, devons mâcher pour vivre. Nos mâchoires nous permettent de nous nourrir et rendent redoutables certains d'entre nous, tels les requins *(ci-contre)* ou les ours ; elles nous donnent aussi un visage, qui joue chez les humains un rôle social essentiel. Mais quelle est l'origine de ces mâchoires qui modèlent la face des gnathostomes ?

On l'ignorait, jusqu'à ce qu'un bloc de calcaire exhumé il y a quelques années dans l'Arctique canadien nous apporte la réponse. Plus précisément, il nous a livré *Romundina stellina*, un petit « poisson » cuirassé datant de quelque 415 millions d'années. Son étude a révélé comment l'apparition progressive de la face s'est organisée en une succession d'étapes à partir de « poissons » sans mâchoires, c'est-à-dire de cyclostomes.

C'est en 1995 que Daniel Goujet, professeur du Muséum national d'histoire

© ian woolf/shutterstock.com

UN REQUIN ET UNE TORTUE partagent cet aquarium. Tous deux, comme les humains, sont des gnathostomes, c'est-à-dire des vertébrés à mâchoires. Mais d'où tirent-ils ce trait commun ?

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

nos mâchoires

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

naturelle à Paris, fit cette découverte. La mission paléontologique sur l'île du Prince-de-Galles qu'il menait alors le conduisait à arpenter avec des collègues les plaines gelées et les torrents glacés de cette île de l'archipel arctique canadien (territoire du Nunavut). Au cours de l'une de ses promenades prospectives sous le sombre ciel arctique, il fit une trouvaille qui, vingt ans plus tard, prit une grande importance scientifique.

Si Daniel Goujet avait pu visiter l'environnement initial dans lequel se sont déposés les bancs calcaires fossilifères vieux de 415 millions d'années qu'il parcourait, il se serait retrouvé dans une mer tropicale peu profonde de l'hémisphère Nord. De nos jours, la platitude de cette ancienne mer est rompue par les petits canyons creusés par les rivières. C'est aux endroits où affleure la roche que se déroule la recherche de fossiles *(voir la photographie ci-dessous)*.

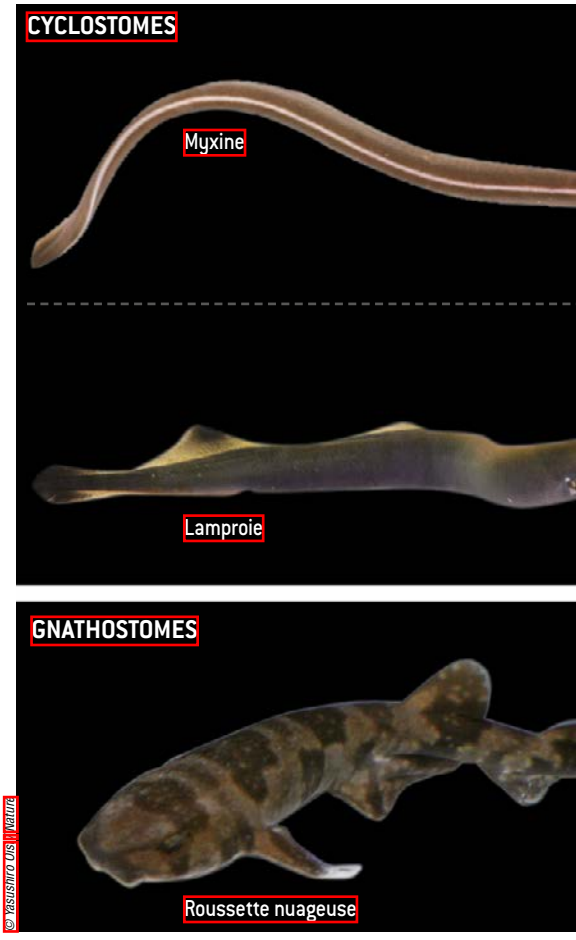
Des terrains fossilifères de plus de 400 millions d'années

L'équipe de Daniel Goujet ne se trouvait pas par hasard sur l'île du Prince-de-Galles : elle y suivait les traces de Raymond Thorsteinsson, le père de la géologie des terres protérozoïques et paléozoïques du Haut-Arctique canadien. Rappelons que le Protérozoïque (il y a 2 500 à 542 millions d'années) recouvre les ères précambriennes, tandis que le Paléozoïque (542 à 252 millions d'années) recouvre le Cambrien, l'Ordovicien, le Silurien, le Dévonien, le Carbonifère et le Permien.

Réalisées dans les années 1960, les explorations de Thorsteinsson, géologue natif du Saskatchewan, au Canada, mais d'origine islandaise, ont révélé quelques gisements intéressants sur l'île du Prince-de-Galles : tous sont datés du Lochkovien (419 à 410 millions d'années), c'est-à-dire du premier étage du Dévonien (419 à 359 millions d'années).

Les couches sédimentaires fossilifères repérées par Thorsteinsson sont impropres à la datation radiochronologique par le potassium-argon, qui s'impose pour de telles échelles de temps (la demi-vie du potassium 40 étant de 1,25 milliard d'années). Cependant, la présence de divers microfossiles, en particulier de conodontes (littéralement : dents en forme de cône) – formes denticulées que l'on attribue à une sorte de ver apparu au Précambrien (il y a plus de 541 millions d'années) et disparu au Trias (252-200 millions d'années) – a permis de placer ces gisements dans la « zone Pesavis ». C'est ainsi que les géologues du Service canadien de géologie nomment les terrains du Haut-Arctique canadien riches en conodontes de l'espèce *Pesavis pesavis*. Or la zone Pesavis est attribuée au Lochkovien.

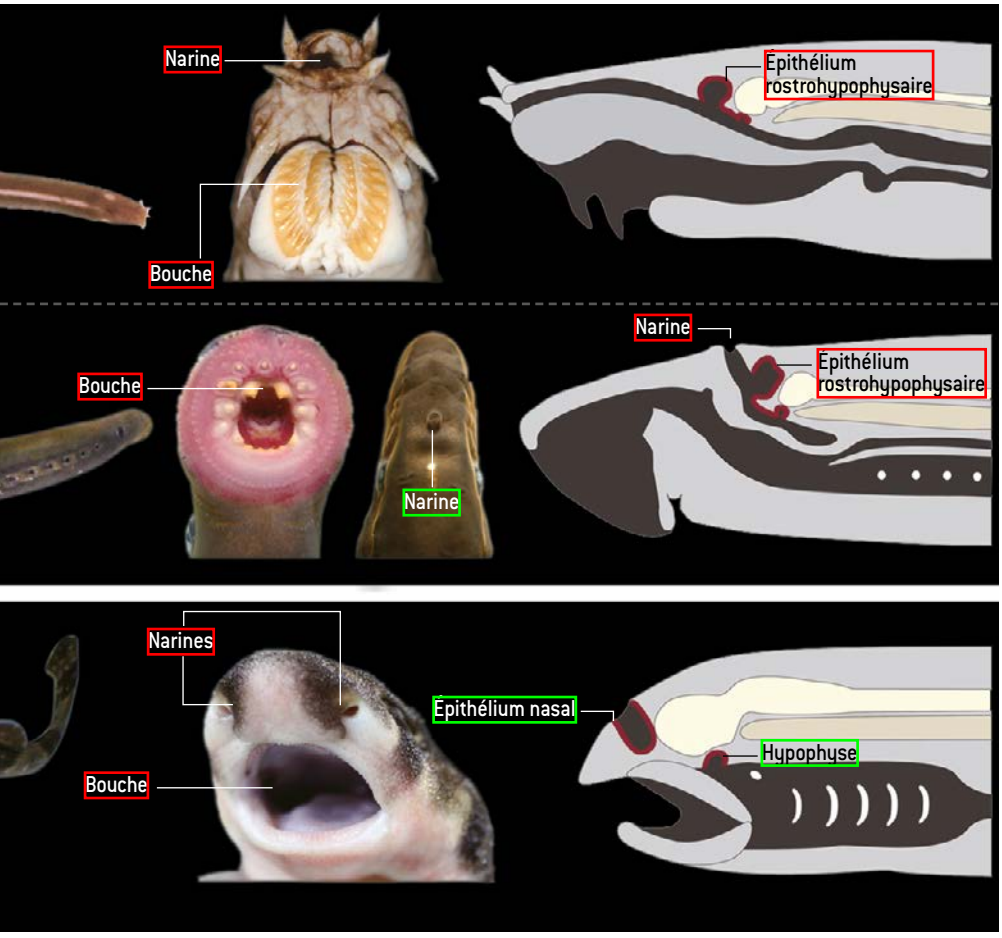
Daniel Goujet voulait récolter le plus possible de matériel susceptible de contribuer à notre connaissance anatomique des premiers vertébrés ; il cherchait en outre à accumuler le maximum d'informations sur les relations trophiques (concernant la chaîne alimentaire) et phylogénétiques (concernant leurs relations de parenté) que ces organismes entretenaient il y a 415 millions d'années, notamment afin de mieux restituer le paléoenvironnement de l'Arctique canadien.



UNE RECHERCHE DE FOSSILES menée dans les années 1990 sur les bancs calcaires de l'île du Prince-de-Galles, dans l'archipel arctique canadien, a conduit à l'exhumation de *Romundina*. Arpentant par temps couvert des affleurements calcaires datant du début du Dévonien (419 à 358 millions d'années), les chercheurs devaient profiter du soleil de minuit.

Jane Gore

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



CYCLOSTOMES ET GNATHOSTOMES, c'est-à-dire les vertébrés sans mâchoires et les vertébrés avec mâchoires, constituent deux groupes distincts. Les cyclostomes comprennent les myxines *(ici Eptatretus burgeri)* et les lamproies *(ici Lethenteron japonicum)*. L'anatomie de leur tête est précisée par des schémas en coupe *(à droite)*. Ces animaux vertébrés sont caractérisés par leur narine unique et leur bouche dépourvue de mâchoires. Dans le cas des myxines, la narine unique débouche en avant du museau. Dans le cas des lamproies, elle s'ouvre un peu au-delà des deux yeux *(voir la tête de lamproie vue de dessus)*. Les gnathostomes *(ici le requin Scyliorhinus torazame, ou roussette nuageuse)* ont une bouche dotée d'une mâchoire surmontée de deux narines débouchant en avant des yeux.

Il s'agit là d'un enjeu scientifique important, car le Dévonien, dont datent les gisements du Haut-Arctique canadien, est l'époque géologique à laquelle les poissons cuirassés se sont diversifiés. Recouverts de plaques osseuses, ces « poissons », que l'on nomme placodermes, valent pour cette raison au Dévonien son surnom d'« âge des Poissons ». Or c'est au sein du groupe florissant des placodermes qu'il faut rechercher les origines des vertébrés à mâchoires et les étapes de la formation de leur face.

Les placodermes, poissons d'eau douce ?

On a longtemps considéré les placodermes comme des poissons d'eau douce, mais les environnements clairement marins découverts par Thorsteinsson sur l'île du Prince-de-Galles démentent cette impression : leur assemblage fossile contient toute une série d'invertébrés indiscutablement marins, tels des coraux et autres brachiopodes ; leurs coquilles, autrefois en aragonite ou calcite (deux biocarbonates), ont toutes été transformées en silice par la fossilisation.

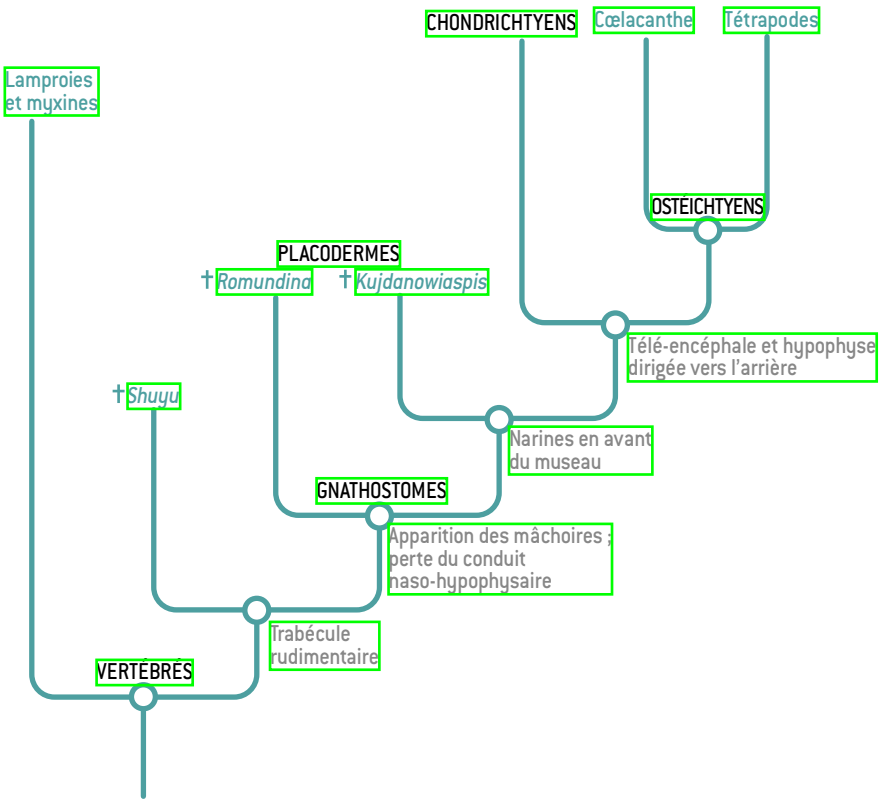
C'est dans ce contexte que Daniel Goujet récolta un jour un spécimen de *Romundina*. Connue par plusieurs fossiles, cette espèce fut décrite en 1975 par le paléontologue suédois Tor Ørvig, qui la nomma *Romundina* en hommage à Raymond Thorsteinsson, le découvreur du gisement. La translittération islandaise de Raymond n'est en effet autre que... Romund. *Romundina* devint ainsi une invitation au voyage dans l'Arctique canadien et en Scandinavie. C'est en quelque sorte ce qui m'est arrivé…

De retour au muséum, Daniel Goujet se servit d'une solution d'acide faible pour débarrasser son spécimen de *Romundina* du plus gros de sa gangue calcaire sans l'endommager. Puis, au cours des années suivantes, le fossile a été l'objet de plusieurs études portant sur l'insertion des muscles oculomoteurs (ceux qui servent à mouvoir les yeux), ou encore sur la phylogénie (le système de parenté) des placodermes. L'importance de *Romundina* ne se révélera qu'après 2007, quand le

L'ESSENTIEL

- Les animaux vertébrés se divisent en deux groupes : les vertébrés à mâchoires et ceux sans mâchoires, telles les lamproies.
- Les premiers, les gnathostomes, sont beaucoup plus représentés aujourd'hui que les seconds, les cyclostomes.
- *Romundina*, un organisme fossile pisciforme cuirassé découvert dans le Haut-Arctique canadien, est une forme intermédiaire.
- Doté de mâchoires, il a des traits de cyclostome, ce qui indique que les gnathostomes sont issus des cyclostomes.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



CET ARBRE OU « CLADOGRAMME » indique les relations de parenté entre les différents types de vertébrés actuels *(branches longues)* et fossiles *(branches courtes)*. L'acquisition progressive des caractères cranio-faciaux des vertébrés à mâchoires (gnathostomes) est précisée aux points de ramification. Des fossiles tels que *Romundina* illustrent certaines des étapes intermédiaires.

fossile fut confié à Sophie Sanchez de l'université d'Uppsala et à Paul Tafforeau de l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*, le synchrotron européen situé à Grenoble), afin que ces chercheurs en sondent l'intérieur à l'aide des rayons X très intenses du synchrotron. Même si le crâne de *Romundina* est de très petite taille – moins de deux centimètres de long *(voir la photographie page 67)* –, le scanogramme réalisé par les chercheurs livra un grand nombre de données numériques décrivant ses structures.

Cette technique se répand de plus en plus en paléontologie. Elle a l'avantage de laisser le fossile intact, alors qu'il y a cinquante ans, l'étude des structures internes du fossile aurait obligé à le découper en tranches, tel un jambon… Aujourd'hui, la même procédure est possible, mais elle n'est que virtuelle, tout en étant très précise.

En 2009, Per Ahlberg de l'université d'Uppsala me proposa de me servir des données obtenues à l'ESRF en scannant *Romundina* pour acquérir une expérience de l'usage du logiciel 3D Mimics. Développé par la société belge Materialise, ce logiciel sert à construire le modèle numérique d'un organisme, fossile ou non. Guidé par les choix d'un spécialiste – médecin, paléontologue, etc. –, il permet de reconstituer et visualiser les structures anatomiques à partir des données fournies par le scanogramme.

Or, plus nous avancions dans l'étude de *Romundina*, plus nous étions passionnés, tant de nombreuses associations de caractères inédites apparaissaient ! Mes collègues de l'université d'Uppsala et moi étions en train de préparer un long article de description anatomique et de comparaison de *Romundina* avec d'autres vertébrés primordiaux, quand, en 2012, des chercheurs japonais publièrent dans la revue *Nature* des résultats qui bouleversèrent nos plans.

Lamproies et myxines : les cyclostomes

Avec leurs collaborateurs, Yasuhiro Oisi et Shigeru Kuratani, du centre RIKEN pour la biologie du développement à Kobe, avaient étudié pendant de nombreuses années le développement du crâne des cyclostomes.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les cyclostomes sont les vertébrés dépourvus de mâchoires, à distinguer des gnathostomes. Les cyclostomes incluent notamment les lamproies (38 espèces) et les myxines (22 espèces) *(voir la figure pages 62 et 63)*. Le mot cyclostome est composé des mots grecs *cyclos* (cercle) et *stoma* (bouche), de sorte qu'on pourrait le traduire par « bouche ronde » ou « bouche en ventouse ».

Pour sa part, le terme gnathostome est composé non seulement du mot *stoma*, mais aussi de *gnathos* signifiant « mâchoire ». Les requins, mais aussi les grenouilles, les serpents, les ours, les humains, etc. sont des gnathostomes.

Outre la présence ou non de mâchoires, ces deux groupes se démarquent par des faces très différentes. Leurs apparences reflètent des organisations différentes des organes internes du crâne, lesquelles résultent de processus embryonnaires distincts. Ainsi, les lamproies ont une

Passer un fossile au scanner à rayons X : une technique de plus en plus répandue en paléontologie.

© Pour la Science (Agnès Vicen Dupra)

seule narine, située entre les deux yeux et très en arrière du bout du museau. Ce dernier consiste en une « lèvre supérieure », une sorte de bord situé en haut de la ventouse que l'animal utilise pour se fixer sur d'autres vertébrés qu'il parasite. La narine s'ouvre sur un conduit « naso-hypophysaire », contenant le système olfactif (un tissu nasal) et l'hypophyse, une glande qui sécrète des hormones. Au fond de ce conduit, l'épithélium nasal se joint à l'hypophyse, laquelle est orientée vers l'avant.

Sur le plan du développement, cela signifie que dans l'embryon du cyclostome un seul amas indivisible de cellules destinées à former un organe sensoriel – ce que l'on nomme une placode – est à l'origine de l'hypophyse et de l'épithélium nasal. Chez les cyclostomes, le télencéphale, c'est-à-dire la partie antérieure du cerveau, est très court.

À l'opposé, un gnathostome (par exemple un humain) a deux narines bien séparées, situées à l'avant du museau et en avant des yeux. Séparée des sacs nasaux par une grande distance, l'hypophyse s'ouvre dans la bouche tout en étant dirigée vers l'arrière.

Gnathostomes : un développement embryonnaire différent

Cette organisation résulte de la présence dans l'embryon du gnathostome de trois placodes bien séparées les unes des autres : deux nasales et une hypophysaire. Par ailleurs, le télencéphale (la partie antérieure du cerveau) d'un gnathostome est très allongé. Au cours du développement embryonnaire des cyclostomes, une masse de tissu,

L'AUTEUR

Vincent DUPRET est paléontologue et mène ses recherches au sein du département de mathématiques appliquées de l'université nationale d'Australie, à Canberra.

Les vertébrés racontés par le registre fossile

Les vertébrés sont les animaux dotés d'une colonne vertébrale ; ce sont des chordés, c'est-à-dire des animaux dotés d'une chorde, le précurseur embryonnaire de la colonne vertébrale. Les vertébrés apparaissent dans le registre fossile de l'Ordovicien (*Sacabambaspis* en Bolivie, il y a 470 millions d'années).

Toutefois, on soupçonne qu'ils existaient déjà au Cambrien : *Haikouichthys*, un animal datant de 530 millions d'années, du Cambrien chinois, pourrait avoir été l'un des premiers vertébrés (hypothèse qui reste discutée).

Quelques millions d'années après l'Ordovicien, au Silurien, les descendants de ces formes primordiales sont plus nombreux dans les océans. Ils sont toujours dépourvus de mâchoires, mais dotés d'une lourde cuirasse osseuse, ce qui est utile dans ces eaux peuplées de prédateurs redoutables (orthocères aux tentacules démesurés ou scorpions de mer géants de deux mètres de long).

Toutefois, la donne est sur le point de changer au Silurien, quand les mâchoires apparaissent chez les vertébrés. Les premiers vertébrés à mâchoires sont les placodermes, nommés aussi « poissons cuirassés. Les placodermes apparaissent au début du Silurien, sans que l'on sache très bien sous quelle forme.

La situation est plus claire à la fin du Silurien. C'est en effet au Dévonien (de 419 à 359 millions d'années), l'âge des poissons, que les placodermes se diversifient en de très nombreuses formes et deviennent les maîtres incontestés des eaux. La preuve en est que nous trouvons leurs fossiles sur tous les continents et dans différents types de roches sédimentaires.

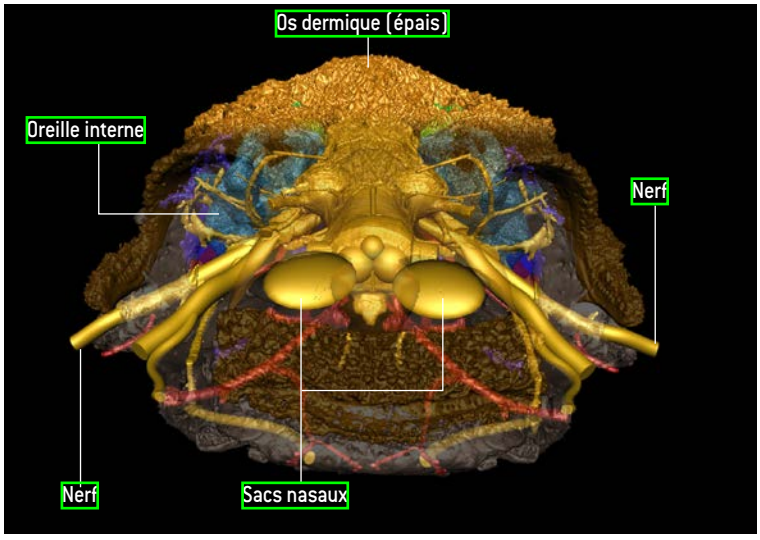
Certains, détritivores (se nourrissant de restes), ne mesuraient que quelques millimètres de long ; d'autres étaient de véritables monstres de huit mètres de long placés au sommet de la chaîne alimentaire. C'est le cas de l'iconique *Dunkleosteus*, dont la mâchoire a la réputation d'avoir été dix fois plus puissante que celle d'un grand requin blanc actuel.

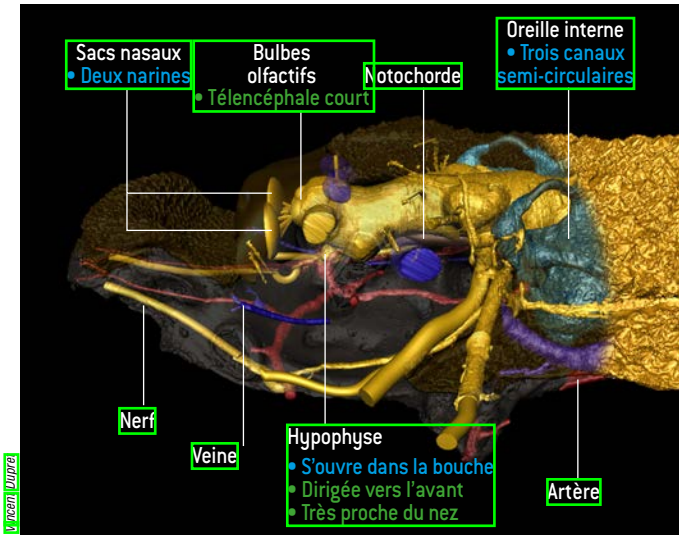
Ce succès n'allait pas durer. La grande crise biotique de la limite Frasnien-Famennien, au Dévonien, fait disparaître 70 % des espèces. Pourtant les placodermes survivent… mais disparaissent quelques millions d'années plus tard à la fin du Dévonien. Les causes en sont encore floues, mais multiples et liées : changements d'environnements et de climats, empoisonnement des eaux dû à la luxuriante végétation et aux sols qu'elle produits, etc.

À la fin du Dévonien, il y a quelque 365 millions d'années, certains vertébrés à mâchoires – les tétrapodes, c'est-à-dire les vertébrés à quatre pattes – commencent à conquérir les milieux terrestres. Les premiers tétrapodes resteront inféodés aux milieux aquatiques ; leurs descendants pourront s'aventurer sur la terre ferme. Mais c'est une autre histoire…

UN EXEMPLE DE TÉTRAPODE, ou vertébré (terrestre) à quatre pattes et doté de mâchoires.

© HKMKshutterstock.com





Vincent Lippe

nommée ectomésenchyme infra-optique prémandibulaire, migre de façon importante de chaque côté du cerveau avant de fusionner à l'avant pour former la lèvre supérieure de l'organisme au-dessous de sa narine unique. Pendant le développement embryonnaire des gnathostomes, ce même ectomésenchyme croît de façon moins importante sous le cerveau, sépare les sacs nasaux, en formant la région trabéculaire, c'est-à-dire la surface d'attache des mâchoires.

En raison de toutes ces différences morphologiques externes, internes ou embryonnaires, on a longtemps cru que la face des cyclostomes n'avait pu évoluer en celle des gnathostomes. C'est du moins l'impression que l'on en a quand on ne s'attache qu'aux organismes actuels. Or les observations de Yasuhiro Oisi et Shigeru Kuratani sur les cyclostomes nous ont permis de voir plus loin que cette apparente absence de lien entre la face des cyclostomes et celle des gnathostomes.

Les cyclostomes, ancêtres de tous les vertébrés ?

Nos confrères nippons ont en effet montré que beaucoup des caractères des myxines sont apparus à la faveur d'évolutions internes à leurs lignées. Cela expliquerait les différences notables séparant les myxines des lamproies, de sorte qu'il serait envisageable que le plan de construction des cyclostomes reflète l'organisation ancestrale de tous les vertébrés. Ces

LE MODÈLE DU CRÂNE de *Romundina stellina* est montré ici sous divers points de vue. Ci-dessus, un aperçu semi-transparent de la face révèle diverses structures reconstruites par ordinateur. Les os et l'oreille interne ont été restitués à partir des données prélevées au scanner. Le remplissage de la cavité endocrânienne, contenant le cerveau, les artères, les veines et la notochorde a été reconstitué en remplissant les cavités, les canaux et les sillons du crâne.
Cette restitution indique que *Romundina* a des caractères propres aux cyclostomes *(en vert)*, mais aussi aux gnathostomes *(en bleu)*.

Alexey Ivanov

ROMUNDINA STELLINA, une vue d'artiste.

considérations les ont amenés en 2012 à proposer qu'un vertébré chinois pisciforme (en forme de poisson) dépourvu de mâchoires, décrit en 2011 – la forme fossile *Shuyu* – serait un intermédiaire entre les cyclostomes et les gnathostomes.

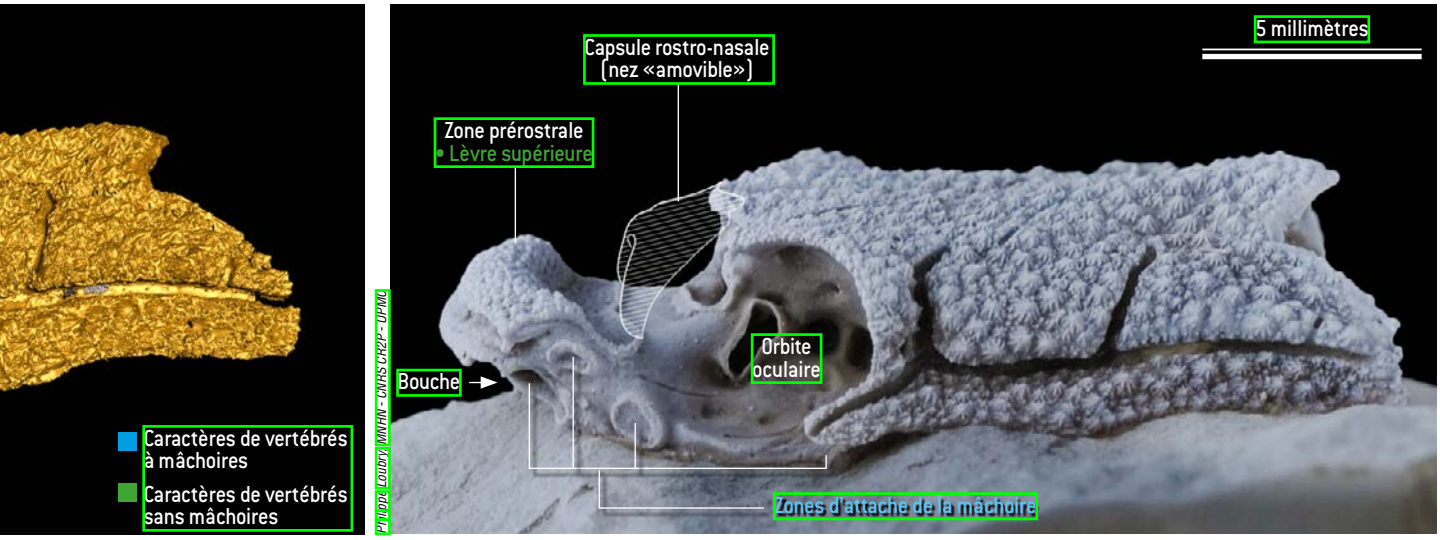
Romundina, à mi-chemin entre les cyclostomes et les gnathostomes

Alors que nous nous concentrions sur la description détaillée de notre fossile, cette nouvelle idée nous a invités à considérer ce dernier d'un œil nouveau : que la face de *Romundina* se situe à mi-chemin entre celle d'un cyclostome et celle d'un gnathostome nous a alors en quelque sorte... sauté au visage ! La face de *Romundina* est un assemblage de structures tenant à la fois des cyclostomes et des gnathostomes modernes.

Romundina est bien un gnathostome, ce que prouve la présence sur son crâne d'une trabécule, c'est-à-dire de la zone d'attache de la mâchoire. Pour autant, les narines sont incluses dans une composante osseuse du crâne qui, caractère étonnant, en est détachée : la capsule rostronasale. Après la mort de l'animal, cette capsule tombe, de sorte qu'elle n'est pas toujours retrouvée avec le reste d'un crâne de *Romundina* (c'est le cas pour notre spécimen canadien).

En avant de cette capsule rostronasale, le museau s'étend en une longue plateforme osseuse qui n'est pas sans rappeler la lèvre supérieure d'une lamproie *(voir la photographie du fossile ci-dessus à droite)*.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



Et qu'en est-il des structures internes du crâne de *Romundina* ? Elles sont toutes aussi surprenantes. La position des narines trahit la présence d'un télencéphale (cerveau antérieur) très court, comme chez les cyclostomes. La surface arrière de la capsule rostronasale, connue à partir d'autres spécimens que le nôtre, ne laisse ainsi aucun doute sur la petite taille du télencéphale et du nerf olfactif, ce qui est une caractéristique de cyclostome. Au niveau du palais et peu en arrière des sacs nasaux, un renfoncement où se logeait l'hypophyse de *Romundina* est visible. Bien que séparée des narines – ce qui est normal chez les gnathostomes – elle reste proche de celles-ci.

Il y a un autre détail surprenant pour le paléontologue. Si cette hypophyse s'ouvrait bien dans la bouche comme chez un vertébré à mâchoires, elle était en revanche dirigée vers l'avant, comme chez un vertébré sans mâchoires *(voir la reconstitution numérique du crâne de Romundina ci-dessus)*.

Ce n'est qu'un peu plus haut dans l'arbre de parenté *(voir pages 62 et 63)* des gnathostomes que la lèvre supérieure disparaît : chez les placodermes de l'ordre des Arthrodires (le plus grand groupe de placodermes), les narines se retrouvent au bout du museau.

C'est par exemple le cas de *Kujdanowiaspis*, un petit placoderme du Dévonien inférieur ukrainien très étudié, qui est donc une référence chez les paléontologues, ou encore de l'emblématique *Dunkleosteus*, énorme placoderme du Dévonien supérieur long de huit mètres, que certains estiment plus puissant que le grand requin blanc. Même si les narines migrent vers le bout du museau, le télencéphale reste court.

Ce n'est qu'avec l'apparition des groupes de gnathostomes modernes, à savoir les poissons cartilagineux (les chondrichthyens, tels que les raies et requins) d'une part et les poissons osseux (les ostéichtyens, tels que les sardines ou les daurades) d'autre part, que le télencéphale s'allonge et que l'hypophyse se loge en position postérieure tout en s'orientant vers l'arrière *(voir l'arbre de parenté sur la double page précédente)*.

Un fossile-clef, qui révèle l'histoire évolutive de notre visage

Ainsi, *Romundina* est un gnathostome, puisqu'il a des mâchoires et une hypophyse séparée des sacs nasaux. Toutefois, nombre de ses structures externes et internes sont proches de celles des cyclostomes : ainsi, ses narines sont doubles comme chez les gnathostomes, mais situées entre les yeux comme chez les cyclostomes.

Cette mosaïque de caractères le place dans la séquence évolutive des gnathostomes après l'agnathe cuirassé *Shuyu*, mais avant les gnathostomes pleinement caractérisés, qui existaient déjà à la fin du Dévonien, longtemps avant nous. Il est clair que *Romundina* constitue l'un des fossiles-clefs expliquant l'évolution de la face des vertébrés à mâchoires, dont notre visage est issu. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. Dupret *et al.*, **A primitive placoderm sheds light on the origin of the jawed vertebrate face**, *Nature*, vol. 507, pp. 500-503, 2014.

M. Zhu *et al.*, **A Silurian placoderm with osteichthyan-like marginal jaw bones**, *Nature*, vol. 502, pp. 188-193, 2013.

F. Savatier, **Un placoderme au sourire ironique,** actualité *Pour la Science*, en ligne le 10 août 2013.

Y. Oisi *et al.*, **Craniofacial development of Hagfishes and the evolution of Vertebrates**, *Nature*, vol. 493, pp. 175-181, 2012.

Z.-K. Gai *et al.*, **Fossil jawless fish from China foreshadows early jawed vertebrate anatomy**, *Nature*, vol. 476, pp. 324-327, 2011.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

MESMER

Bruno Belhoste

En 1784, deux commissions officielles condamnent la doctrine de Mesmer, qui triomphe à Paris en « magnétisant » des malades. Sur fond de déclin de l'absolutisme politique et de naissance des sciences expérimentales, l'affaire cristallise les passions…

À la fin du XVIIIe siècle, le docteur Franz Anton Mesmer, qui prétend guérir toutes sortes de maux en « magnétisant » ses patients, connaît un succès retentissant à Paris. Mais en août 1784, sa doctrine est condamnée par deux commissions officielles composées de médecins et de savants. Ses procédés curatifs sont jugés inopérants. Ses guérisons ne seraient que le produit de l'imagination des malades. Quant au « magnétisme animal », le prétendu agent de ces guérisons, il n'aurait aucune existence réelle.

Une vive controverse entre partisans et adversaires du mesmérisme suit cette condamnation. Mesmer lui-même finit par quitter Paris et la France. Les passions et l'intérêt retombent et le public se détourne du mesmérisme, qui semble rapidement oublié avant de resurgir sous des formes nouvelles au début du XIXe siècle.

Depuis, les historiens se divisent sur cette doctrine. Certains ont souligné le rôle joué par sa condamnation dans le processus visant à séparer vraies et fausses sciences. C'est la position de l'historien des

L'ESSENTIEL

- Mesmer a fondé la doctrine du magnétisme animal, selon laquelle un fluide magnétique emplit tout l'Univers. Il prétendait soigner les malades en agissant sur la circulation de ce fluide dans leur organisme.
- En 1984, deux commissions officielles, composées de médecins et de savants, condamnent sa doctrine.
- Cette condamnation fait évoluer l'idée du magnétisme animal. Une forme tardive, fondée sur la suggestion, pourrait avoir inspiré les psychothérapies.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

ou la chute du magnétiseur

LE BAQUET MAGNÉTIQUE, développé par Mesmer en réponse à l'afflux de patients, est une cuve destinée à des cures collectives. Contenant de l'eau et du verre pilé, le récipient est censé accumuler du « fluide magnétique », que les patients reçoivent en saisissant les tiges de fer sortantes. Mesmer *(à droite)* dirige la séance.

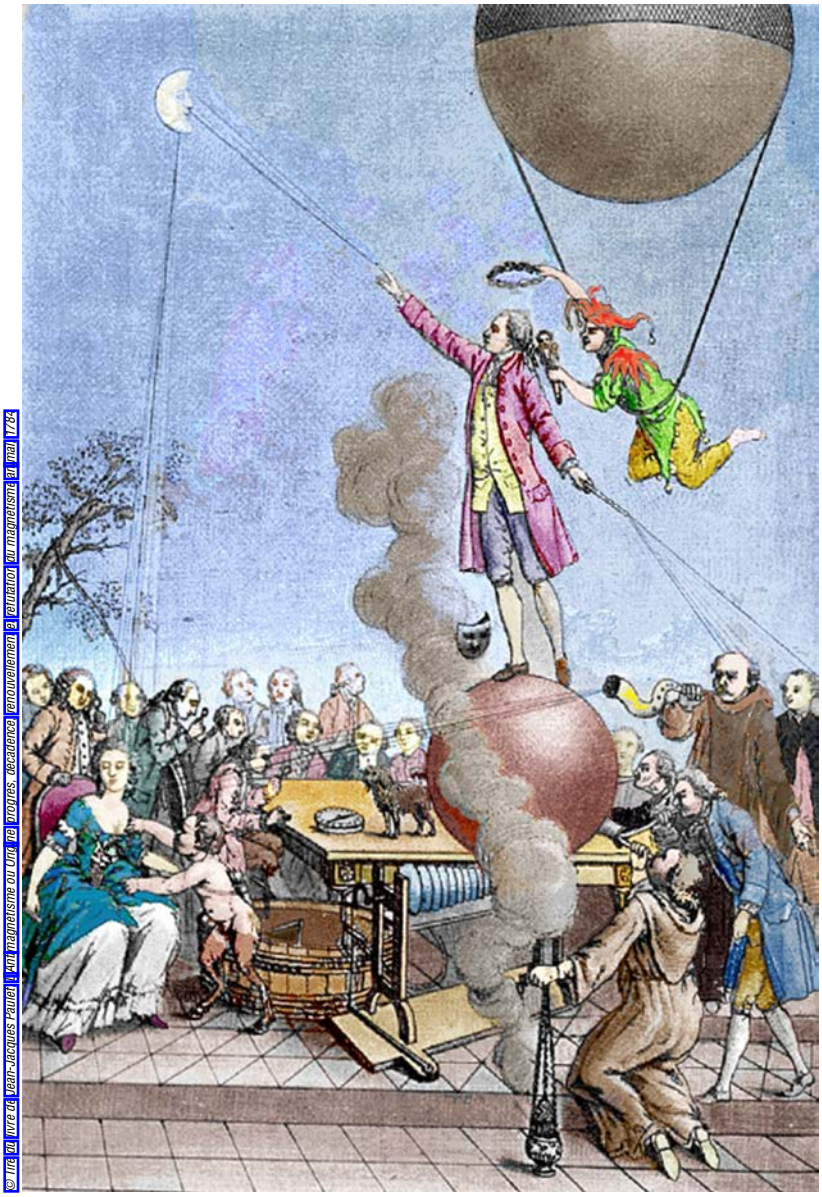
© Stefano Bianchetti/Corbis

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

L'AUTEUR

Bruno BELHOSTE est professeur d'histoire à l'université Paris 1 Panthéon Sorbonne et directeur de l'Institut d'histoire moderne et contemporaine.

sciences américain Charles Gillispie, pour qui Mesmer ne serait qu'un imposteur ou un illuminé ayant abusé de la crédulité des malades et du public. À l'inverse, d'autres le considèrent comme une sorte de précurseur de Freud et de tous les psychothérapeutes du XX^{e} siècle, car il est l'un des premiers à avoir analysé des phénomènes tels que les convulsions d'un point de vue médical et non religieux ; il aurait ainsi ouvert la voie à des traitements prenant en compte ce qu'on appellera l'inconscient à la fin du XIX^{e} siècle. Le psychiatre Henri Ellenberger a beaucoup contribué à cette représentation favorable de Mesmer et du mesmérisme.



© Jean-Jacques Fauvel, Un magnétiseur ou Une nouvelle découverte, 1784

POUR MESMER, LES ASTRES AGISSENT SUR LES HOMMES et leur santé *via* le fluide magnétique, qui emplit tout l'Univers. Sur cette gravure satirique, on voit le magnétiseur en train de canaliser ce fluide et de le rediriger vers ses patients.

L'une et l'autre de ces approches nous semblent pourtant contestables. Renvoyer *a priori* le mesmérisme dans la catégorie des fausses sciences en reprenant les arguments de ses adversaires serait faire preuve non seulement de partialité, mais d'anachronisme. Le jugement porté par les autorités scientifiques de l'époque sur la doctrine de Mesmer doit être l'objet de l'enquête historique et non son point de départ. Quant à rattacher le mesmérisme à la psychanalyse, c'est faire fi de certaines différences fondamentales : le philosophe François Azouvi a par exemple montré qu'il n'existe pas d'entité psychique chez Mesmer. Là encore, ce serait pécher par anachronisme. Il est nécessaire, pour comprendre l'œuvre de Mesmer, de revenir sans *a priori* sur l'histoire de sa réception et de sa condamnation, en les replaçant dans leur contexte. Nous verrons que l'affaire est alors bien plus complexe qu'il n'y paraît…

Des guérisons avec des aimants… puis sans

Mesmer est un médecin allemand, né en 1734 sur les bords du lac de Constance. En 1759, il part étudier à Vienne, où il commencera à exercer. Il s'intéresse très tôt à la médecine astrale, qui postule une influence des corps célestes sur les hommes et leur santé. Prétendant s'inspirer de la théorie gravitationnelle des marées de Newton, il affirme que cette influence à distance s'exerce *via* un « fluide magnétique » emplissant tout l'Univers. Homme éclairé, époux d'une riche veuve, amateur de musique et ami de la famille Mozart, Mesmer est apprécié de la haute société viennoise, où il recrute nombre de ses patients. En 1774, il essaie de les soigner avec des aimants, en collaboration avec l'astronome et physicien Maximilien Hell. Il s'aperçoit vite qu'il n'a pas besoin de ces intermédiaires matériels pour obtenir des guérisons ou prétendues telles : la théorie du magnétisme animal est née.

Selon Mesmer, le magnétisme animal, ou fluide magnétique, est répandu dans tout l'Univers et, comme son nom l'indique, il est source de la vie animale. À l'instar de l'électricité, ce fluide d'un type nouveau circule. Il pénètre dans tous les corps vivants *via* le système nerveux, connaît, comme les marées, des flux et des reflux sous l'influence des astres et peut s'accumuler, par exemple dans un récipient ou dans un arbre. Toute perturbation de son

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

mouvement est cause de maladie. Le thérapeute cherche alors à rétablir sa bonne circulation dans le système nerveux en le concentrant, en le canalisant et en débloquant les éventuelles obstructions.

Pour cela, nul besoin d'appareil compliqué : c'est le corps même qui assure ces opérations, principalement par le toucher. Certaines personnes auraient en effet une capacité à accumuler du fluide magnétique et à le transmettre. Pour soigner le patient, le thérapeute n'a souvent qu'à pointer une baguette, voire un doigt, sur certaines zones sensibles (par exemple le plexus solaire, sous le sternum, où s'entrecroisent de nombreux nerfs). Une crise, parfois violente, marque le retour du fluide magnétique à un mouvement régulier – et donc la guérison.

Bien que cette méthode curative n'agisse que sur les nerfs, elle serait efficace contre toutes sortes de maladies. Mesmer n'est pas loin de penser qu'il s'agit d'un remède universel, ce qui lui vaudra d'être accusé de charlatanisme.

À Vienne, le médecin compte rapidement des partisans et des adversaires. Au début de l'année 1778, il décide de se rendre à Paris. Il est persuadé que son fluide magnétique constitue une découverte fondamentale en physique et souhaite le présenter à l'Académie des sciences, considérée alors comme la plus grande autorité scientifique en Europe. Mais à son arrivée, l'Académie refuse d'examiner ses travaux. Même échec auprès de la Société royale de médecine, qui marque son désintérêt.

Mesmer choisit de persévérer et s'installe dans le Marais, où il se constitue une petite clientèle. Il rencontre bientôt un docteur de la Faculté de médecine de Paris, Charles Deslon, qui s'enthousiasme pour ses procédés et lui suggère de se tourner vers la Faculté. C'est le début d'un long conflit. Pendant plusieurs mois, trois docteurs – dépourvus de tout mandat officiel – suivent les traitements de Mesmer, mais sans se laisser convaincre. Au final, ils refusent de se prononcer. En septembre 1780, la Faculté de médecine condamne le magnétisme animal et menace Deslon d'exclusion pour avoir publié sans autorisation un ouvrage en faveur de cette doctrine, qu'elle le somme de renoncer à défendre.

Or, dans le même temps, la réputation de Mesmer auprès du public ne cesse de grandir. Les patients affluent à son cabinet, où il installe un « baquet magnétique » – une sorte de récipient accumulateur de fluide autour duquel il assoit les malades pour des cures collectives *(voir la figure page 69)*. Nombre d'entre eux appartiennent à la cour. Mesmer, qui menace de quitter la France, obtient finalement le soutien du gouvernement grâce à l'intervention de la reine. Alors qu'un accord semble trouvé pour l'ouverture d'une clinique magnétique aux frais de l'administration, Mesmer rejette cette solution. Il reste tout de même à Paris sur les conseils de deux de ses anciens malades, Bergasse et Kornmann. Rompant avec Deslon, qu'il accuse de lui avoir volé ses procédés, il décide d'enseigner lui-même le magnétisme animal.

Avec quelques disciples, il crée fin 1783 la Société de l'harmonie universelle pour assurer la diffusion de sa doctrine. Le succès est au rendez-vous. En quelques semaines,

La chute de Mesmer, une affaire politique ?

L'affaire Mesmer dépasse le cadre purement scientifique. La condamnation est initiée par le baron de Breteuil, qui appartient à l'une des factions de la cour. Or beaucoup de partisans du mesmérisme sont eux-mêmes de hauts personnages. Une lutte de pouvoir entre ces différents groupes sous-tend donc peut-être en partie la condamnation.

Celle-ci a des implications politiques encore plus profondes. Considérant que le magnétisme animal lie les hommes avec l'Univers et les hommes entre eux, les partisans de Mesmer en font la base du lien social ; ce dernier est un lien entre égaux, où le seul rapport de domination éventuel concerne le magnétiseur et le magnétisé. Le magnétisme animal apparaît ainsi comme une critique médicale de la société hiérarchique et inégalitaire de l'Ancien Régime.

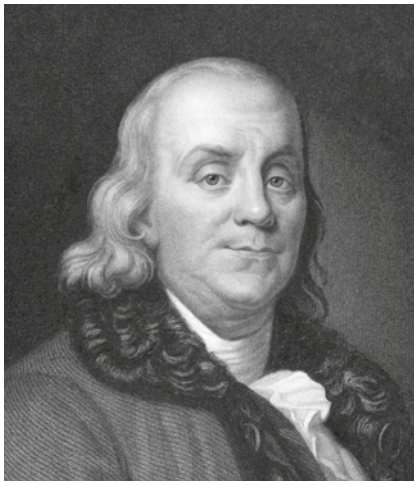
Après la condamnation, les partisans de cette doctrine critiquent violemment les institutions officielles. Ils vont jusqu'à parler de « despotisme ministériel ». L'affaire entre ainsi dans les grands débats autour de l'absolutisme qui font rage à la veille de la Révolution.

une centaine de personnes souscrivent une inscription payante. On compte parmi elles des médecins et des chirurgiens, mais aussi et surtout des curieux, souvent issus du grand monde. C'est alors que le baron de Breteuil, chargé de superviser les sociétés savantes, décide de faire évaluer par des experts officiels la doctrine et les procédés de Mesmer.

L'affaire du magnétisme animal est d'abord une affaire de médecine. Deux institutions médicales sont consultées pour donner leur avis : la Faculté de médecine de Paris et la Société royale de médecine. La Faculté, qui représente la corporation des médecins parisiens, dispose du monopole de l'exercice et de l'enseignement de la médecine dans la capitale. On l'a vu, elle a déjà condamné la doctrine de Mesmer. En fait, elle ne s'est même pas alors donné la peine de la réfuter. Aux yeux de la Faculté, Mesmer et Deslon sont coupables de n'avoir pas respecté son autorité en prétendant, contre ses enseignements, soigner toutes les maladies par une méthode entièrement nouvelle. Cela a suffi pour en faire des charlatans.

La Faculté a été d'autant plus encline à se montrer intraitable que son monopole corporatif est contesté. Le pouvoir a créé en 1778 la Société royale de médecine, chargée d'évaluer les remèdes, d'enquêter sur les maladies et, plus généralement, de réformer l'art médical en s'appuyant sur les sciences. La Faculté de médecine y a aussitôt vu un empiétement. Sur la défensive, elle tend à se raidir, quitte à apparaître de plus en plus conservatrice. Condamner une innovation comme le mesmérisme est aussi une façon pour elle de défendre une autorité menacée.

© Shutterstock.com/georgios Kollidas


© Shutterstock.com/georgios Kollidas

LAVOISIER ET FRANKLIN, alors membres de l'Académie des sciences française, participent à l'évaluation de la doctrine de Mesmer. Engagé dans une lutte plus large pour imposer une science expérimentale rigoureuse, Lavoisier *(en haut)* combat tout particulièrement cette doctrine.

La Société royale de médecine a elle-même été confrontée à Mesmer dès son arrivée à Paris, en 1778. Elle a alors refusé de donner un avis sur ses prétendues guérisons. Pour autant, elle ne se désintéresse pas de l'affaire, qui rentre dans ses prérogatives. Aussi, le jour même où le baron de Breteuil sollicite la Faculté de médecine de Paris, la Société charge le médecin Michel-Augustin Thouret d'enquêter sur le magnétisme animal. Elle demande en outre d'être associée à son examen officiel. Le ministre nomme une deuxième commission choisie parmi ses membres plutôt qu'une commission mixte, car celle-ci aurait probablement été refusée par la Faculté.

Deux institutions rivales, mais qui s'accordent sur la condamnation

Il existe donc deux commissions officielles pour évaluer le magnétisme animal, l'une de la Faculté, l'autre de la Société royale de médecine. Si l'une et l'autre sont hostiles à Mesmer, on pourrait penser que c'est pour des raisons différentes : la première parce qu'elle défend une conception traditionnelle de la médecine, la seconde parce qu'elle promeut une médecine scientifique fondée sur l'observation et l'expérience. En réalité, il n'en est rien. La première commission, composée de docteurs de la Faculté, a en effet demandé l'assistance de l'Académie des sciences, ce qui a rapproché son profil de celui de la seconde. Les deux commissions partagent en fait le même point de vue sur le magnétisme animal.

Finalement, ce sont les savants, et non les médecins, qui vont imposer leur marque sur la condamnation officielle du mesmérisme. Les quatre membres de l'Académie des sciences adjoints à la première commission sont Jean-Sylvain Bailly, Benjamin Franklin, Jean-Baptiste Le Roy et Antoine Lavoisier. L'astronome Bailly, protégé du baron de Breteuil, tient la plume. Franklin, alors ambassadeur américain, joue un rôle mineur dans la commission, de même que son ami le physicien Le Roy. Le chimiste Lavoisier, en revanche, s'engage à fond dans le combat contre le mesmérisme et inspire directement sa condamnation.

Entre mai et juillet 1784, les commissaires entreprennent une série d'expériences

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

pour établir si le prétendu fluide magnétique de Mesmer existe ou non. Des épreuves en aveugle sont organisées avec des malades aux domiciles de Franklin et de Lavoisier. Un patient de Deslon est par exemple prié de toucher un arbre qu'il croit magnétisé et perd aussitôt connaissance. En réalité, l'arbre n'a subi aucun traitement particulier, ce qui discrédite l'éventuel rôle du fluide magnétique aux yeux des commissaires et souligne plutôt celui de l'imagination. De façon générale, tous les tests se révèlent négatifs.

La première commission en conclut que le fluide magnétique animal n'existe pas et que ses effets ne sont que des produits de l'imagination. Elle affirme que les procédés de Mesmer sont non seulement inopérants mais aussi nuisibles, car ils peuvent aggraver le mal et détourner les malades de méthodes plus sûres. Bailly rédige en outre un rapport secret dans lequel il souligne les dangers du magnétisme animal pour les bonnes mœurs, en particulier vis-à-vis des femmes : selon le rapport, les crises consécutives aux passes du magnétiseur, notamment aux attouchements sur les parties érogènes du corps, ne seraient rien d'autre que des orgasmes.

Le rapport de la seconde commission, plus bref, confirme ces conclusions. La Société royale de médecine y ajoute l'enquête très documentée de Thouret, selon laquelle il n'y a rien de nouveau dans les thèses de Mesmer. Celles-ci ne feraient que répéter les divagations du « magnétisme sympathique », inventé au XVI[e] siècle par le médecin Paracelse et ses disciples.

En condamnant la doctrine du magnétisme animal, les savants visent, au-delà de Mesmer, tous les faiseurs de systèmes qui prétendent alors réformer la physique et contestent l'autorité des institutions officielles, souvent avec l'oreille attentive du public. L'objectif est d'établir une séparation nette entre vraies et fausses sciences, entre savants sérieux et imposteurs. Pour Lavoisier, en particulier,

En 1784, des expériences avec des malades mettent à l'épreuve le magnétisme animal. Elles se révèlent toutes négatives.

L'IDÉE DU MAGNÉTISME ANIMAL évolue après la condamnation de Mesmer, notamment sous l'impulsion de Puységur. Ce dernier, sur cette gravure de Laurent Gsell (1890), magnétise des patients au pied d'un arbre. Il explique l'action du thérapeute par des effets psychiques, fondés sur la suggestion, et non par le fluide magnétique – dont les autorités viennent d'affirmer l'inexistence.

À ÉCOUTER

Le jeudi 3 septembre 2015, de 14h à 15h, Bruno Belhoste reviendra sur la condamnation de la doctrine de Mesmer dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. **www.franceculture.com**

BIBLIOGRAPHIE

B. Belhoste et N. Edelman (éd.), **Mesmer et mesmérismes, le magnétisme animal en contexte**, Omniscience, 2015.

B. Belhoste, **Paris savant. Parcours et rencontres au temps des Lumières**, Armand Colin, 2011.

Ch. C. Gillispie, **Science and Polity in France : the End of the Old Regime**, Princeton University Press, 1980.

H. Ellenberger, **À la découverte de l'inconscient. Histoire de la psychiatrie dynamique**, 2e édition, Fayard, 1993 (original en anglais publié en 1970).

F. Azouvi, **Sens et fonction épistémologique de la critique du magnétisme animal par les Académies**, *Revue d'histoire des sciences*, vol. 29, pp. 123-132, 1976.

la lutte contre le mesmérisme s'inscrit dans un combat plus large pour imposer une science expérimentale rigoureuse, fondée sur la mesure et le calcul. Après s'en être pris au magnétisme animal, il réduit l'année suivante le « phlogistique », ou principe du feu, à un simple produit de l'imagination et fonde sur l'oxygène la nouvelle chimie de la combustion.

Une doctrine qui reste influente

La condamnation par les commissions officielles en août 1784 paraît avoir disqualifié le magnétisme animal, malgré une défense bruyante des partisans de Mesmer. Un examen plus attentif conduit cependant à nuancer cette première impression. D'une part, l'affaire a une dimension politique essentielle, qui ne disparaît pas avec le verdict des commissions *(voir l'encadré page 72)*. D'autre part, le magnétisme animal se diffuse largement chez les médecins, après comme avant la condamnation. Certes, la Faculté de médecine de Paris a épuré ses rangs, exigeant des partisans du mesmérisme qu'ils se soumettent ou se démettent ; presque tous ont préféré s'incliner, au moins en apparence. Mais elle n'a pas osé s'attaquer à Antoine Laurent de Jussieu, membre de l'Académie des sciences et de la Société royale de médecine, formé par Deslon au magnétisme animal. Or Jussieu s'est désolidarisé de la seconde commission officielle, dont il était membre, et a publié un rapport indépendant où il défendait la réalité des effets du magnétisme animal.

Quant à la Société royale de médecine, elle s'est bien gardée de sanctionner en son sein les partisans de Mesmer, certains d'entre eux comptant parmi ses membres les plus éminents. En province, enfin, les médecins ont pu continuer à se revendiquer du magnétisme animal sans être inquiétés. Il resterait à mesurer de manière plus précise l'influence réelle du mesmérisme au-delà de l'élite médicale parisienne, mais tout porte à croire qu'elle a été importante – et l'est restée après la condamnation officielle.

En revanche, cette condamnation a sans doute contribué à faire évoluer la doctrine en mettant en avant le rôle de l'imagination. Alors même que les commissions prononcent leur verdict, un disciple de Mesmer, le marquis de Puységur, annonce avoir découvert un phénomène extraordinaire, le somnambulisme magnétique, autrement dit l'hypnose. En magnétisant des patients, il les plongerait dans un état de conscience modifié, voisin du sommeil, où ils seraient capables de diagnostiquer leur propre pathologie, voire de prédire le jour de leur guérison. Mesmer n'ignorait pas l'existence de ces états de conscience, qu'il qualifiait de critiques, mais il refusait d'accorder de l'importance aux manifestations extraordinaires qui les accompagnaient, telles la lucidité et la voyance.

Le point important, pour Puységur et ses partisans, est que le somnambulisme magnétique pouvait être interprété comme un phénomène purement psychique, fondé sur la suggestion, et qu'il n'avait donc aucun rapport nécessaire avec l'existence physique du magnétisme animal, dont les commissaires venaient justement d'affirmer l'inanité. De nombreuses variantes sont alors proposées pour expliquer l'action curative du magnétiseur sur le magnétisé, mais toutes vont dans le sens d'une action à caractère psychique, voire d'ordre surnaturel. Ainsi, à l'approche originelle, essentiellement physique et physiologique, se substitue une nouvelle approche, qui domine le mouvement du magnétisme animal après le retrait de Mesmer et Deslon.

Une approche psychique et non plus physique

Selon François Azouvi, c'est de cette forme tardive, psychique et spiritualiste, du magnétisme animal, développée en réponse à la condamnation de 1984, que les psychothérapies et la théorie de l'inconscient sont les héritières. Pour ma part, je pense qu'il existe aussi chez Mesmer des éléments précurseurs : il attribue ainsi à l'homme un « instinct », une sorte de sixième sens qui s'exprime pendant le sommeil – ainsi que pendant les états de conscience critiques – et explique les rêves. Il s'agit cependant là d'un autre aspect de ses théories, sans lien direct avec le fluide magnétique.

L'analyse en contexte de la condamnation du magnétisme animal par les commissions officielles en 1784 révèle ainsi la complexité d'une affaire qui ne se réduit pas à la réfutation d'une fausse science et à la dénonciation d'un charlatanisme. Nous sommes encore loin d'en percevoir tous les enjeux. Nul doute qu'une meilleure compréhension de l'épisode du mesmérisme contribuera à renouveler l'étude des mutations profondes qu'ont connues les savoirs scientifiques et médicaux à la fin du XVIIIe siècle. ■

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

© RADIO FRANCE / CHRISTOPHE ABRAMOWITZ

france culture C'EST POUR VOUS

LA MARCHE DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr

Pour la rentrée faites **le plein de nouvelles expériences**

En CADEAU de bienvenue :

Une batterie externe* pour recharger votre smartphone ou votre tablette et poursuivre **votre lecture en toute tranquillité sur www.pourlascience.fr !**

Cette batterie externe au design élégant et épuré pourra aisément se glisser dans votre poche pour vous permettre de recharger à tout moment jusqu'à deux appareils à la fois : smartphone, tablette, appareil photo... Elle comprend aussi un indicateur de charge lumineux et des ventouses pour fixation à l'arrière de votre écran afin d'avoir un support de visionnage.

Modèle Powerbank Mini Squid Argent - Capacité de la batterie : 5 200 mAh - 2 ports USB + 1 port Micro USB - Poids : 125 gr - Dimension : H 85 x P 43 x L 23 mm - Câble USB/Micro USB fourni - (valeur : 34,99 €)

* Jusqu'à épuisement du stock. Livraison sous 3 semaines environ dans la limite des stocks disponibles

OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à :
Groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06

Votre abonnement INTÉGRAL

8,20€ par mois seulement

le magazine + le hors-série chez vous
+ l'accès numérique illimité à toutes les archives sur **www.pourlascience.fr**

1. MA FORMULE

Mon CADEAU de bienvenue

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre « Intégrale » à 8,20€/mois.**
Je reçois **le magazine *Pour la Science*** (12 nos/an)
+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)
+ mon cadeau. Je bénéficie aussi de l'accès numérique illimité aux archives sur **www.pourlascience.fr.**

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

_____@_____

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **8,20€/mois* et reçois en cadeau**
la batterie externe (réf. 00BATT). Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 9,70€ par mois. Abonnement en reconduction tacite dénonçable à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT 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.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom _____

Adresse _____
Numéro et nom de la rue

_____
Code postal Ville Pays

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN _____
Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Acount Number)

BIC _____
Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

POUR LA SCIENCE

3 - Date et signature obligatoires

A _____

Date _____

Signature :

NOM DU CRÉANCIER
Pour la Science – 8 rue Férou – 75006 Paris

ICS N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 99€****
sans bénéficier du cadeau.
** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€

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

❑ Par carte bancaire N° _____
Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ❑.

Offre réservée aux nouveaux abonnés (ou à d'anciens abonnés) jusqu'au 30/09/2015

PLS455B

LOGIQUE & CALCUL

La beauté mise en formules

Entamée en 1933 par le mathématicien américain George Birkhoff, la recherche de mesures scientifiques du beau se poursuit avec des moyens théoriques et pratiques renouvelés.

Jean-Paul DELAHAYE

George Birkhoff (1884-1944) était l'un des plus brillants mathématiciens de sa génération. Professeur à Harvard pendant plus de trente années, il est connu en particulier pour son « théorème ergodique » généralisant la loi forte des grands nombres, qui affirme en particulier que quand on lance indéfiniment une pièce de monnaie non truquée, la proportion de piles (et de faces) tend vers 1/2. En 1933, il écrivit un livre ambitieux *Mesure esthétique* (*Aesthetic Measure*) où il définit des mesures de la qualité esthétique des œuvres artistiques.

Bien sûr, Birkhoff et ceux qui explorent ce sujet ont parfaitement conscience que la réussite d'un tel travail ne peut être que partielle : dans nos jugements esthétiques, notre culture, notre société, notre époque, notre expérience et notre sensibilité jouent de grands rôles. Une mesure de nature mathématique ne peut donc convenir à tous. Cependant, pour les figures géométriques et pour les formes abstraites, comme celles de la musique, pour la composition et la structure générale des œuvres, il n'est pas absurde que nous nous retrouvions tous, et que cette sensibilité partagée soit accessible à l'analyse et mesurable. C'est le projet que Birkhoff poursuit dans les 300 pages de son livre. Voici la présentation qu'il en fait.

« Il est important de noter que les objets appartenant à une classe particulière ont des valeurs esthétiques naturellement comparables. L'artiste et le connaisseur excellent à mener de telles comparaisons. Si l'étude scientifique atteint son objectif, elle doit fournir une base rationnelle à ces évaluations intuitives. C'est là le problème fondamental de l'esthétique : déterminer, pour chaque classe d'objets esthétiques, les attributs spécifiques sur lesquels leur valeur repose. [...] L'expérience esthétique se décompose en trois phases. (1) Un effort préliminaire d'attention nécessaire à l'acte de perception, qui augmente en proportion de ce que nous appelons la complexité (C) de l'objet. (2) Le sentiment de la valeur ou de la mesure esthétique (M) qui récompense cet effort. (3) Enfin, une prise de conscience que l'objet est caractérisé par une certaine harmonie et symétrie et qu'il contient de l'ordre plus ou moins dissimulé (O), ce qui semble nécessaire à l'effet esthétique. »

Une formule générale pour la qualité esthétique

Fort de cette analyse, Birkhoff va définir la qualité esthétique des productions artistiques. Son objectif est d'évaluer des œuvres artistiques de même nature, par exemple des motifs décoratifs, ou des vases, comme le feraient, en moyenne, des êtres humains.

Le projet peut sembler déraisonnable, mais, formulé avec un peu de précaution comme le fait Birkhoff, il prend de la consistance. Les nombreux travaux qui ont prolongé ses idées prouvent qu'il a créé un domaine de recherche où se développent de nombreuses pistes de réflexion tissant des liens nouveaux entre sciences et arts.

La formule générale que Birkhoff défend pour mesurer la qualité esthétique M d'un objet, d'un dessin ou d'une œuvre est $M = O/C$ où O est une mesure de son ordre et C une mesure de sa complexité.

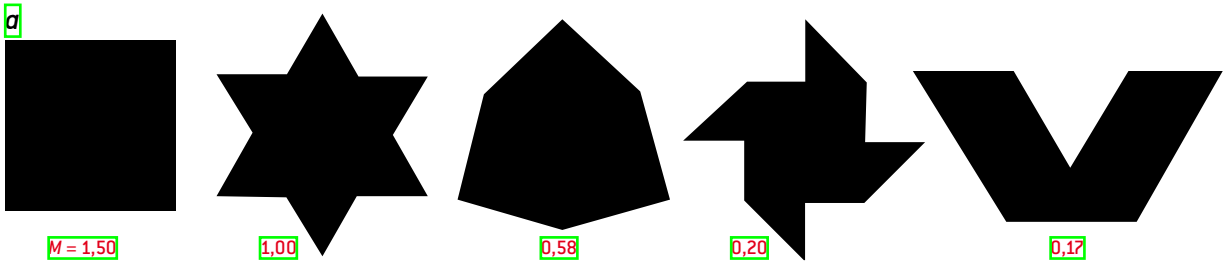
Notons que la formule de Birkhoff ne s'applique pas aux objets trop simples et ne permet donc pas de trancher le débat sur la forme des rectangles : un rectangle dont le rapport des côtés est le nombre d'or, $(1+\sqrt{5})/2 \approx 1{,}618$, est-il plus esthétique qu'un autre ? La question est controversée (*voir dans cette rubrique « La numérologie du nombre d'or », Pour la Science, septembre 1999*). Assez sagement, Birkhoff pensait, comme une partie importante de ceux ayant à ce jour mené des expériences sur la question, que rien ne permet de départager les rectangles dotés de proportions simples : un carré, un rectangle d'or, un rectangle dont le rapport des côtés est $\sqrt{2}$ (formats A4, A3, etc.) ou $\sqrt{3}$, un rectangle obtenu en accolant deux carrés...

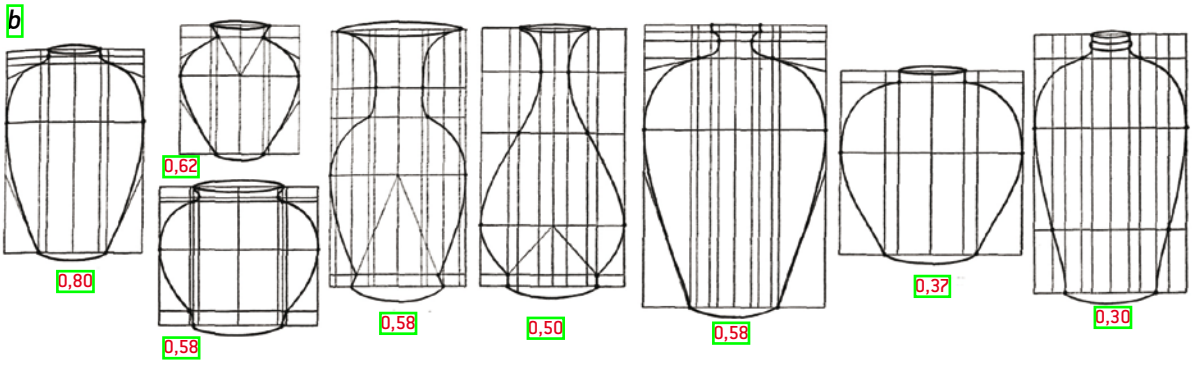
Les formes polygonales un peu plus complexes que les rectangles ont permis à Birkhoff de mettre en œuvre sa méthode pour mesurer l'intérêt esthétique de 90 formes polygonales avec sa formule $M = O/C$.

Pour justifier sa démarche, il a insisté sur l'idée que tout le monde s'accorde à trouver un triangle équilatéral plus beau qu'un triangle quelconque et qu'on doit pouvoir classer objectivement les polygones. Après une

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

L'esthétique selon George Birkhoff





George Birkhoff a construit une mesure *M* de l'esthétique sur la base de son idée que *M* doit être de la forme *O*/*C*, où *O* est une mesure d'ordre et *C* une mesure de complexité. Il a donné une définition précise de ces deux paramètres dans le cas de formes polygonales. Plus *M* serait grand, plus le polygone serait beau. Birkhoff a appliqué sa méthode à 90 polygones. Les résultats pour quelques-uns d'entre eux sont indiqués en *(a)*.

À la page 78 de son livre sur la mesure esthétique, Birkhoff exprime son admiration pour une forme particulière d'art géométrique : « L'excellence des vases chinois, et plus généralement de la poterie chinoise, est bien connue. R. Hobson dans son livre sur l'art chinois écrit "Nulle part ailleurs sans doute, la suprématie de la Chine est autant marquée que dans les arts de la céramique. Les agréables formes de la poterie T'ang, les fines porcelaines monochromes des Sung et les magnifiques jarres à trois couleurs des Ming sont des choses inégalables". Il est notable aussi que les Chinois aient utilisé des dessins de vases totalement symétriques, produisant une intéressante variété de motifs géométriques. »

Birkhoff a tenté de mesurer la qualité esthétique des vases à partir de sa formule. Pour lui, un vase est déterminé par une courbe qui, en tournant autour d'un axe vertical, en fixe la forme. Il mesure la complexité de la courbe par le nombre de ses points singuliers : extrémités, points d'inflexion, points anguleux, points où la tangente à la courbe est horizontale ou verticale. Ce nombre est la complexité *C*. L'ordre *O*, lui, est déterminé en calculant les coordonnées des points singuliers et en comptant combien de fois deux coordonnées sont égales ou dans un rapport de 1 à 2. Cette mesure est appliquée à huit exemples de vases chinois *(b)*. Birkhoff a utilisé sa mesure pour imaginer de nouveaux vases *(c)*.

Depuis, on a montré que la mesure proposée par Birkhoff pour les vases est sensible aux petites déformations, ce qui est ennuyeux puisque les artisans ne réalisent pas les modèles avec une parfaite exactitude. Cela a conduit à définir une variante de la mesure de Birkhoff (T. Staudek, *On Birkhoff's aesthetic measure of vases*, Faculty of Informatics, Masaryk University Report Series, FIMU-RS-99-06, 1999).

La mesure de Birkhoff pour les vases a été utilisée récemment pour créer aléatoirement, à l'aide de programmes, de nouvelles formes de vases et les classer (K. Reed, « Aesthetic measures for evolutionary vase design », dans *Evolutionary and Biologically Inspired Music, Sound, Art and Design*, Springer, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7834, pp. 59-71, 2013).

© D.R.

analyse d'une quinzaine de pages, Birkhoff introduit une formule à cinq paramètres pour mesurer O dans le cas de formes polygonales. Sa formule prend en compte l'existence d'une symétrie verticale, V ; l'existence de rotations laissant invariante la figure, R ; la présence d'horizontales et de verticales, HV ; l'équilibre, c'est-à-dire la position décentrée ou non du centre de gravité, E ; les positions des sommets et les longueurs des côtés qui sont plus ou moins uniformément réparties, ce qui peut agir négativement sur la sensation esthétique, F. Cela lui donne la formule : $O = V + R + HV + E - F$. Nous n'indiquons pas tous les détails de l'évaluation numérique, ils occupent deux pages entières du livre.

La complexité, C, est mesurée par le nombre de droites qui permettent de contenir tous les côtés du polygone ; si le polygone est convexe, C est le nombre de côtés.

Chacun jugera sur les quelques images reproduites dans l'encadré page 79, et évaluées par cette méthode, de la pertinence des critères de beauté de Birkhoff. En utilisant d'autres paramètres soigneusement introduits et discutés, Birkhoff a appliqué sa méthode aux vases. Récemment, l'approche a été testée et utilisée pour engendrer de nouveaux modèles de vase et a donné d'intéressants résultats.

Une recherche sans cesse renouvelée

Un problème dans la conception de Birkhoff, même pour ceux qui pensent qu'on doit poursuivre dans sa voie, est l'arbitraire des paramètres qu'il introduit pour mesurer l'ordre et la complexité d'une classe particulière d'objets et qu'il combine d'une façon particulière. Un autre chercheur, face à la même classe d'objets, proposera sans doute d'autres paramètres et les combinera différemment.

La théorie de l'information et la théorie de la calculabilité ont introduit des notions universelles attachées à tout objet numérique. S'appuyer sur elles pour concevoir les mesures de O et C est donc apparu une piste pour suivre l'idée de Birkhoff.

En 1948, la théorie de l'information de Claude Shannon, que Birkhoff n'a pu connaître, a suggéré une méthode pour évaluer l'ordre et la complexité. Cette théorie introduit en particulier l'entropie, qui mesure la quantité d'information contenue ou fournie par une source d'information, par exemple une œuvre d'art.

En s'appuyant sur les idées de Shannon, le philosophe allemand Max Bense et l'ingénieur français Abraham Moles défendirent des lectures nouvelles de la formule O/C de Birkhoff. Chaque création artistique part d'un répertoire fixé d'éléments (couleurs, tracés élémentaires, sons, mots, etc.) qui est transmis, partiellement, dans l'objet artistique. Créer est une activité de sélection parmi l'ensemble des possibilités offertes par le répertoire. Le répertoire d'un peintre, par exemple, est la palette de couleurs dont il dispose, chaque couleur possible étant affectée d'une probabilité ; le tableau est le résultat du choix, pour chaque élément de sa surface, d'un élément du répertoire. On peut alors considérer que la redondance (mesurée par l'autocorrélation statistique) du tableau est l'ordre O du tableau, et que l'entropie de Shannon de la palette (assimilée ici à sa richesse en possibilités) est sa complexité C.

D'autres façons d'utiliser la théorie de l'information de Shannon sont envisageables. Il en est ainsi de l'approche statistique menée par Jaume Rigau, Miquel Feixas et Mateu Sbert, de l'université de Gérone en Espagne, appliquée à un ensemble de neuf tableaux *(voir l'encadré page ci-contre)*.

L'utilisation de la théorie de Shannon en esthétique reste incertaine et n'a connu qu'un succès limité. Sans doute l'utilisation des notions statistiques pour l'analyse d'une image (ou d'une musique, etc.) est-elle insuffisamment précise : ces notions ne prennent pas en compte l'organisation structurelle détaillée des objets. Dans le cas d'une peinture par exemple, utiliser les mêmes pixels qu'une image A et en changer la disposition (les déplacer, sans en supprimer ni en ajouter) donne une image B dont la plupart des paramètres statistiques, l'entropie en particulier, seront les mêmes que ceux de l'image A. Comment éviter cette imprécision ?

Née durant la décennie 1930-1940 des travaux de Kurt Gödel, Alonzo Church et Alan Turing, la théorie de la calculabilité, l'étude mathématique des mécanismes élémentaires de calcul, aurait intéressé Birkhoff. Cette théorie introduit une nouvelle vision de l'information et de la complexité grâce à la théorie algorithmique de l'information qui la prolonge et qui, à partir de 1965, a été développée par Andreï Kolmogorov, Leonid Levin et Gregory Chaitin.

Cette théorie définit des notions universelles d'ordre et de complexité qui permettent de nouvelles lectures de la formule de Birkhoff, prenant en compte les aspects structurels des œuvres. Nous allons en évoquer plusieurs, mais d'autres sont possibles et les recherches se poursuivent.

Longueur de programme et temps de calcul

En 1998, Vladik Kreinovich, Luc Longpré et Misha Koshelev, de l'université du Texas à El Paso, en se fondant sur une analyse fine de ce que représentent un temps de calcul et la longueur d'un programme, proposent de définir la valeur esthétique d'un objet numérique Ob par la plus grande valeur possible du rapport $M = 2^{-I(P)}/t(P)$ où P est un programme qui produit Ob, $I(P)$ étant la longueur de P et $t(P)$ le temps de calcul de P.

Cette définition est justifiée par ses auteurs à l'aide d'une analyse mathématique impossible à détailler ici. Mais elle se comprend, puisque l'on retrouve finalement la formule de Birkhoff avec l'interprétation suivante des paramètres O et C :

C est le temps de calcul $t(P)$ de P ; les objets complexes étant longs à calculer, ce temps de calcul est une mesure de complexité.

$O = 2^{-I(P)}$, ce qui correspond à l'idée que plus il y a d'ordre dans un objet Ob, plus $I(P)$ est petit car simple à décrire, et donc plus $2^{-I(P)}$ est grand.

Les auteurs reconnaissent cependant que leur formule est inutilisable en pratique car, pour identifier le programme qui réalise le maximum M de la formule, il faudrait mener une énumération infinie ! Même en se limitant aux programmes de longueur raisonnable, par exemple moins de 1 000 caractères, cela dépasserait les capacités disponibles aujourd'hui, puisque le nombre de programmes possibles de longueur n donnée augmente exponentiellement avec n.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

Les expériences des chercheurs de l'université de Gérone

Jaume Rigau, Miquel Feixas et Mateu Sbert, de l'université de Gérone en Espagne, ont mené des expériences portant sur de vrais tableaux. Ils ont en particulier calculé des mesures esthétiques fondées sur la formule de Birkhoff et utilisant la théorie de l'information de Shannon et la théorie algorithmique de l'information de Kolmogorov. Leur méthode consiste d'abord à diviser le tableau en *N* pixels.

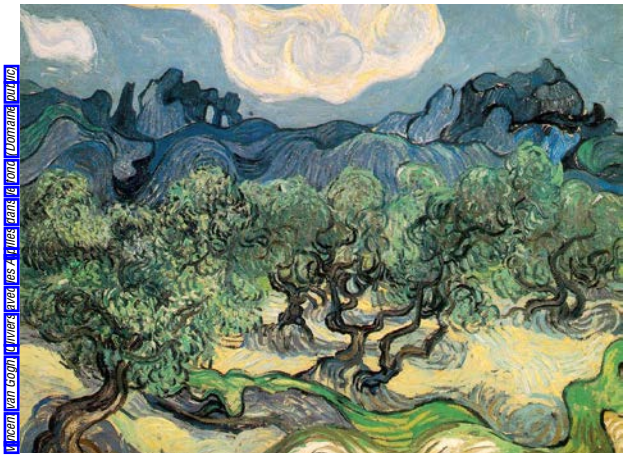
Chaque pixel peut prendre un nombre déterminé d'états, en général une puissance 2^k de 2, par exemple 8 couleurs, ce qui correspond à $k = 3$. Ce nombre k étant fixé, l'entropie maximale d'un tableau est $H_{max} = Nk$. En effet, s'il y a huit couleurs et qu'elles sont utilisées sans en favoriser aucune, il faudra 3 bits d'information pour spécifier chaque pixel, donc $3N$ bits au total. C'est la situation de désordre maximal, donc d'entropie maximale. Cependant, un tableau réel utilise les couleurs avec des proportions spécifiques, par exemple plus de bleu que de rouge. L'entropie H_r de l'ensemble des pixels du tableau réel, qui est une mesure de cet usage restreint des possibilités de la palette, est donc plus petite que H_{max}. Plus l'écart entre H_{max} et H_r est grand, plus il y a d'ordre dans le tableau. D'où l'idée de prendre $O = H_{max} - H_r$ et $C = H_{max}$ pour mesurer les paramètres de la formule générale $M = O/C$ de Birkhoff, ce qui donne une mesure esthétique à la Shannon : $M_S = (H_{max} - H_r)/H_{max}$.

Une application possible de la théorie de la complexité algorithmique consiste à prendre $H_{max} = Nk$ comme mesure de complexité (c'est le nombre de bits nécessaires pour mémoriser un tableau quand on réserve k bits pour chaque pixel). La taille H_K en bits de l'image compressée par un algorithme de compression d'images sans perte est considérée comme une approximation de la complexité de Kolmogorov du tableau. On choisit alors de poser : $O = H_{max} - H_K$ et $C = H_{max}$, ce qui donne une mesure esthétique à la Kolmogorov : $M_K = (H_{max} - H_K)/H_{max}$.

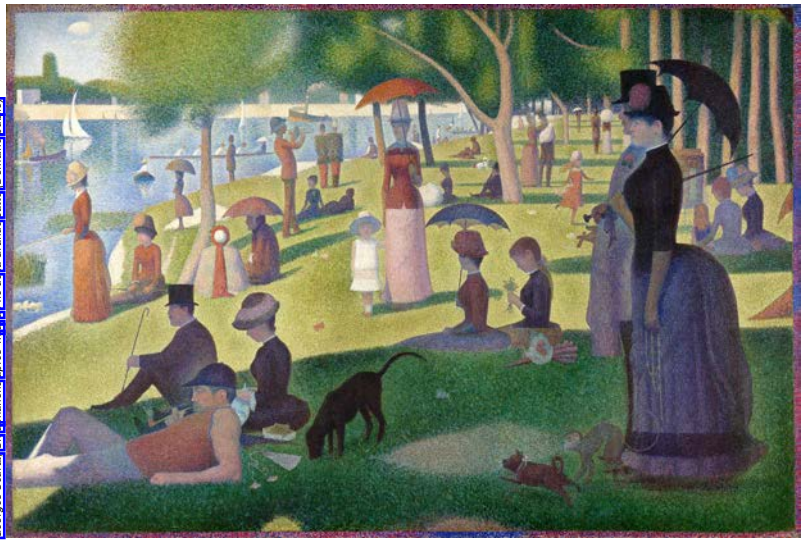
La mesure M_S, dont le défaut principal est de se fonder uniquement sur la distribution statistique des pixels sans prendre en compte leurs positions, favorise clairement les tableaux les plus simples. La mesure M_K prend plus finement en compte la structure complète du tableau.

Les chercheurs de Gérone ont examiné trois tableaux de Mondrian, trois de Seurat et trois de van Gogh. Ceux de Mondrian, très géométriques, sont considérés comme les plus beaux par les mesures esthétiques M_S et M_K. Cela peut se comprendre : avec les Mondrian, l'ordre, mesuré aussi bien à la Shannon qu'à la Kolmogorov, est assez élevé. En effet, H_r et H_K étant petits, la différence entre les deux termes du numérateur est grande, d'où un quotient O/C élevé. Les van Gogh sont favorisés par M_K, beaucoup plus qu'ils ne le sont par M_S ; cela s'explique par le fait nettement perceptible que la structure géométrique des van Gogh est plus simple que celle des Seurat, ce que la mesure M_S ne voit pas, car elle ne prend en compte que la fréquence d'usage des couleurs et pas leur disposition sur la toile, alors que M_K prend en compte la disposition spatiale.

On trouvera plus de détails dans l'article de Jaume Rigau, Miquel Feixas et Mateu Sbert *(voir la bibliographie)*.



Vincent van Gogh, Vivaces avec des fleurs, Domaine public



Georges Seurat, Un dimanche après-midi à la Grande Jatte, Domaine public

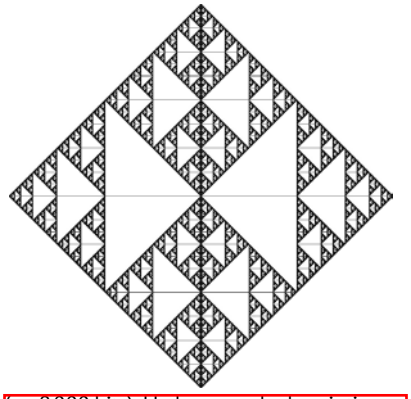
DEUX DES NEUF tableaux considérés par les chercheurs espagnols. Le van Gogh ci-contre a pour mesures $M_S = 0{,}280$ et $M_K = 0{,}650$. Pour le Seurat ci-dessous, on a $M_S = 0{,}290$ et $M_K = 0{,}539$.

Une mesure esthétique selon Roland Yéléhada

La mesure esthétique proposée par Roland Yéléhada s'appuie sur la théorie algorithmique de l'information. L'exemple considéré ici est un double tapis de Sierpinski. L'image fractale est un carré de 1024 pixels de côté. La mémorisation de cette image pixel par pixel occupe donc 1,048 million de bits, soit 131 032 octets.

Il existe une définition surprenante de cette image (elle a été utilisée pour obtenir le dessin) : « Placez une droite de 2^{20} cases noires sur un quadrillage carré illimité de cases blanches, puis appliquez 2^{20} fois à cette configuration les règles du *Jeu de la vie* de John Conway (à savoir : *Une case blanche devient noire si exactement 3 cases voisines sont noires parmi les 8 cases qui l'entourent ; une case noire le reste si exactement deux ou trois cases voisines sont noires et, sinon, devient blanche*). Placez ensuite le résultat dans une image carrée de côté 1024. »

On peut facilement écrire en moins de 1 000 caractères un programme effectuant cette tâche. L'existence de ces programmes courts signifie que la complexité de Kolmogorov de l'image est inférieure à 1 000 octets



(ou 8 000 bits). Un langage de description d'images tel que celui utilisé par le compresseur d'image PNG exploite des régularités dans l'image en noir et blanc, par exemple le fait qu'il y a de longues séries de pixels noirs et blancs consécutifs. On obtient ainsi l'image du double triangle de Sierpinski, qui comporte un million de pixels noirs ou blancs, à l'aide de 8 522 octets seulement.

La compression PNG fait donc passer la taille du fichier de 131 032 octets à 8 522. C'est bien, mais c'est très loin de l'optimal qui conduirait à moins de 1 000 octets. L'écart entre un codage « en ressource limitée » effectué par le compresseur PNG et la compression optimale est, pour Roland Yéléhada, une mesure esthétique de l'image.

Pour l'auteur de cette mesure, le sentiment de beauté est d'autant plus grand qu'est grande la différence entre la taille de la représentation optimale d'une image (se fondant sur la « compréhension » complète de l'image ou de ce qui l'engendre) et la taille de la représentation en ressource limitée dont est capable notre cerveau.

En 1995, le Français Roland Yéléhada a suggéré une autre idée tirée de la théorie algorithmique de l'information pour définir et mesurer la valeur esthétique d'un objet numérique Ob. La mesure proposée est $K_l(Ob) - K(Ob)$, où $K(Ob)$ est complexité de Kolmogorov de Ob, c'est-à-dire la taille du plus court programme qui donne Ob, et $K_l(Ob)$ la complexité de Kolmogorov en ressource limitée de Ob, c'est-à-dire la taille du plus court programme qui donne Ob en considérant un langage de programmation aux possibilités limitées.

Une complexité liée aux capacités humaines ?

Le langage à ressource limitée à prendre en compte correspondrait aux capacités de calcul d'un humain, ou au moins tenterait de les modéliser. Un tel langage exprimerait simplement que des points sont alignés, car nous le percevons immédiatement, mais ne pourrait pas exprimer simplement des relations du type « $59\,049 = 3^{10}$ » ou « la huitième décimale de $\sin(\pi/7)$ est 3 », relations que les langages de programmation habituels expriment brièvement et testent instantanément, mais qui dépassent nos capacités d'analyse immédiate.

L'idée provient des images fractales. On les considère souvent belles et complexes, mais leur complexité est une illusion car les images fractales résultent de formules courtes et se définissent en utilisant des programmes simples de quelques lignes. Ces images nous paraîtraient belles car, sans que nous puissions le justifier, du fait de nos capacités limitées de calcul, nous aurions une certaine perception de leur simplicité. Cette perception proviendrait des multiples répétitions et déformations de motifs et de couleur à diverses échelles entre parties de la fractale que, sans réussir à les analyser complètement, nous ressentirions.

La sensation d'observer une image subtilement organisée (faible complexité de Kolmogorov), et de forte complexité de Kolmogorov en ressource limitée, donnerait un sentiment d'ordre mystérieux qui serait la beauté. Plus l'écart entre les deux complexités serait grand, plus la satisfaction esthétique serait forte.

L'harmonie et la beauté que nous attribuons facilement aux formes du vivant seraient de la même nature. Nous les percevons clairement, mais nous n'avons pas la capacité de les comprendre entièrement et donc, pour décrire un animal, nous sommes obligés de le faire élément par élément (forte complexité de Kolmogorov en ressource limitée), sans profiter de tous les raccourcis que son unité permettrait si nous en avions la compréhension profonde (relativement faible complexité de Kolmogorov).

L'idée de Roland Yéléhada oblige à postuler une aptitude naturelle innée à évaluer la complexité de Kolmogorov d'un objet numérique. Or il est difficile de comprendre l'origine de cette aptitude, puisque justement ce que nous percevons n'est qu'une complexité de Kolmogorov en ressource limitée.

Une autre idée est directement liée à la théorie moderne de l'information, telle que Kolmogorov, Leonid Levin et Gregory Chaitin

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

l'ont reformulée à partir de 1965. Elle consiste à postuler que la valeur d'une création artistique est la quantité de travail et d'intelligence qui ont été mises en œuvre pour la produire. Si on suit cette idée, il faut bien sûr prendre en compte toute la préparation menée par l'artiste avant qu'il commence l'œuvre : la maturation, les essais préliminaires, l'élaboration progressive d'une conception du monde et d'un style personnel, l'apprentissage de son art auprès de maîtres et de guides, voire de concurrents. La mesurer exige d'évaluer les traces laissées par cette phase d'élaboration.

Profondeur logique

La « profondeur logique de Bennett » est une mesure du « contenu en calcul » présent dans un objet numérique Ob. En première approximation, c'est le temps de calcul du programme le plus court qui produit Ob *(voir dans cette rubrique « Qu'est-ce qu'un objet complexe ? », Pour la Science, mai 2013)*. Son utilisation semble alors s'imposer pour mathématiser l'idée de maturation. Plus une œuvre inclut la trace d'une longue élaboration, assimilée ici à un long calcul, plus sa valeur artistique est grande. Un objet Ob étant donné, l'idée est alors de définir le *O* de Birkhoff par la profondeur logique de Bennett de Ob, et la complexité *C* par la complexité de Kolmogorov de Ob.

Pour que nous puissions calculer instantanément le rapport *O*/*C*, il faudrait mesurer ces paramètres *O* et *C* avec un langage de programmation en ressource limitée modélisant les capacités de l'être humain.

Recopier une œuvre n'est pas un travail créatif, même si la copie parfaite peut procurer à l'observateur la même satisfaction esthétique que l'œuvre originale. Si l'on souhaite mesurer non seulement la valeur esthétique d'une œuvre, mais aussi l'apport particulier du travail de l'artiste, il faut envisager autre chose. La théorie du calcul dispose d'un concept qui autorise cela. Un objet numérique E étant donné, on peut ne s'intéresser qu'aux programmes qui accèdent à cet objet : les programmes connaissant E. Le temps de calcul du programme minimal dans cette catégorie de programmes pour produire un autre objet Ob est alors une mesure du contenu supplémentaire de calcul qu'il a fallu mener pour créer Ob par celui qui connaît E. C'est la « profondeur logique de Bennett de Ob relativement à E ». Ce concept semble correctement définir le travail réalisé par un artiste quand il crée Ob dans un contexte donné, qui met à sa disposition des œuvres déjà créées dont l'ensemble est E.

Ce dernier point permet de distinguer deux types de mesures esthétiques : la mesure d'une valeur esthétique en soi, qui ne se préoccupe pas de la nouveauté ou non du travail, et la valeur relative, dont la fonction serait d'évaluer la force d'innovation de l'œuvre.

Toutes ces idées sont séduisantes et générales. Elles semblent capables, en théorie, de mesurer la valeur esthétique d'une œuvre et sa nouveauté en les distinguant l'une de l'autre. Mais il faut reconnaître que les outils disponibles pour mesurer réellement la profondeur logique de Bennett sont limités. Des travaux menés par Hector Zenil, Cédric Gaucherel et moi-même ont permis de mesurer effectivement des valeurs approchées de la profondeur logique de Bennett d'images de petite taille, en utilisant des algorithmes de compression de données. Cependant, l'extension de telles mesures à des images plus grandes, tentée avec Jean-François Colonna, rencontre des difficultés techniques qui, pour l'instant, interdisent de traiter de façon satisfaisante des œuvres réelles.

Certains verront dans ces difficultés la confirmation du préjugé que la science ne peut pas parler de manière précise et objective de l'art, et que les méthodes suggérées par la théorie moderne de l'information, quoique séduisantes et profondes, sont condamnées à l'échec. Cette fois, non parce qu'elles sont fausses ou arbitraires (comme les méthodes à la Birkhoff) ou ne prennent que partiellement en compte les œuvres (comme les méthodes à la Shannon), mais parce que les calculs d'évaluation sont trop longs. La théorie définit des conceptions plausibles et des modèles abstraits séduisants, mais les utiliser serait hors de portée des machines actuelles. ■

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).

BIBLIOGRAPHIE

J. McCormack, M. d'Inverno (éds.), **Computers and Creativity**, Springer, 2012.

H. Zenil, J.-P. Delahaye et C. Gaucherel, **Image characterization and classification by physical complexity**, *Complexity*, vol. 17(3), pp. 26-42, 2012.

J. Rigau, M. Feixas et M. Sbert, **Informational aesthetics measures**, *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 2, pp. 24-34, 2008.

V. Kreinovich, L. Longpré et M. Koshelev, **Kolmogorov complexity, statistical regularization of inverse problems, and Birkhoff's formalization of beauty**, *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, International Society for Optics and Photonics, 1998.

G. Birkhoff, **Aesthetic Measure**, Harvard University Press, 1933.

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

SCIENCE & FICTION

Jabba le Hutt, une limace de l'espace ?

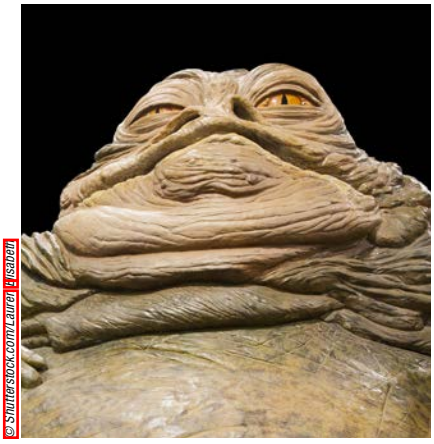
George Lucas, le créateur de l'univers Star Wars, *s'est peut-être inspiré de l'aspect de nombreux animaux terrestres à corps mou et de leurs techniques de locomotion pour imaginer le personnage de Jabba le Hutt.*

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Parmi les extraterrestres tirés des œuvres de science-fiction, certains ont un corps mou et visqueux, qui inspire souvent le dégoût. Le plus célèbre extraterrestre à corps mou est sans aucun doute Jabba le Hutt, seigneur du crime qui apparaît pour la première fois dans l'épisode VI, *Le Retour du Jedi* (George Lucas, 1983) et qui ressemble à une grosse limace. Sur Terre, certains organismes à corps mou semblent tout droit tirés de la science-fiction, tel *Hallucigenia (voir la figure page 85)*. D'autres forment le groupe des « mollusques » qui rassemble aujourd'hui environ 130 000 espèces. Si leur étude – la malacologie – est une discipline de recherche déjà bien développée, ébauchons ce que pourrait être son équivalent extraterrestre dans le cas particulier de Jabba le Hutt. À quelle espèce pourrait-il être rattaché et comment un être mou aussi gros peut-il se déplacer à l'air libre ?

Sur Terre, les mollusques sont apparus il y a au moins 500 millions d'années. Ils ont un mode de vie aquatique, amphibie ou rampant. Leur structure résulte d'un compromis entre plasticité du corps et maintien des organes. Ces animaux sont recouverts d'une peau élastique, visqueuse, à écailles ou nue, et reliée à des glandes sébacées ou séreuses. Et pour parfaire leur aspect, ils exhibent parfois des tentacules et des pustules.

Terrestres, ces organismes sont de petite taille à cause de l'absence de squelette interne : trop grand, leur corps s'effondrerait sous leur propre poids. De ce point de vue, Jabba ne cadre guère. Dans l'eau, être massif et mou pose moins de problème grâce à la poussée d'Archimède. Ainsi, les plus grandes formes de vie de notre planète sont molles et aquatiques, tels des vers marins de plusieurs dizaines de mètres ou des méduses géantes (masses gélatineuses pleines d'eau) à l'image de *Cyanea capillata* qui mesure jusqu'à 2 mètres de diamètre avec des tentacules de plus de 30 mètres de long.



© Shutterstock.com/Laurel Fisabeth

JABBA LE HUTT est un gangster de l'univers *Star Wars*. Sa physionomie rappelle aussi bien la limace que le crapaud.

Dès lors, si Jabba est trop gros pour vivre hors de l'eau, comment de surcroît fait-il pour se déplacer ? Les organismes mous ou à peau molle, mollusques ou non, ont de nombreuses glandes sécrétant un mucus qui participe à la locomotion, mais pas uniquement. Chez des espèces subdésertiques, ce mucus hydrate les œufs qui sont logés dans une sorte de poche marsupiale. Pour d'autres espèces, le mucus facilite le transit des aliments dans l'œsophage et empêche les sucs gastriques de dissoudre les parois de l'estomac (cela expliquerait pourquoi Alien bave autant). Et le mucus prévient l'assèchement des tissus chez les amphibiens actuels, dont la peau est très lisse.

Pour revenir au rôle du mucus dans la locomotion, celui des anguilles et des lamproies – tous deux vertébrés aquatiques – facilite leur déplacement dans l'eau et les rend plus difficiles à capturer par leurs prédateurs.

Notons cependant que sécréter un mucus n'est pas obligatoire pour ramper : les serpents, par exemple, avec leurs écailles et

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

© 2015 Marc Boutavant (marcboutavant.cossima-productions.com)

***HALLUCIGENIA* A EXISTÉ !**
Cette forme étonnante n'est pas une hallucination d'artiste : il s'agit de la reconstruction d'un animal à corps mou dont les fossiles ont été retrouvés dans les schistes de Burgess, au Canada.

leur locomotion ondulatoire de type reptation, s'en sortent très bien.

L'exemple qui nous intéresse le plus dans l'étude comparée de Jabba est le cas des gastéropodes terrestres. Le mucus joue un rôle crucial dans la locomotion des escargots et des limaces, dont une grande partie du corps est en contact avec le sol. Ces mollusques ont un pied et une tête distincts. Le premier forme une large sole ventrale permettant les déplacements, tandis que leur tête comporte des yeux et une sorte de langue râpeuse nommée radula. Les gastéropodes constituent le plus grand groupe animal après les insectes et sont apparus durant le Cambrien (il y a 541 à 485 millions d'années). D'après certaines traces fossiles, ce sont les seuls mollusques à s'être aventurés sur la terre ferme durant le Carbonifère (il y a 359 à 300 millions d'années). Comment les gastéropodes font-ils pour avancer sans lever le pied ?

Pour adhérer au sol, l'escargot sécrète un mucus aux caractéristiques particulières. Au repos, c'est un gel d'eau qui contient 3 à 4 % de longues protéines. Il forme une colle solide permettant au pied de l'escargot d'adhérer à n'importe quelle surface. Mais ce gel devient liquide s'il subit une contrainte mécanique trop importante : on dit qu'il est thixotrope. L'un des modes de déplacement de l'escargot consiste à contracter, parallèlement à la surface, l'arrière de son pied pour le faire avancer d'environ un millimètre. Au cours de cette étape et à cet endroit, la mince couche de mucus subit des forces de cisaillement qui la rendent liquide. C'est ce qui permet au pied de glisser localement. Ensuite, la zone de contraction du pied se propage vers l'avant tandis que, sous l'arrière du pied désormais immobile, la couche de mucus redevient solide et collante. Une fois l'onde de compression arrivée à l'avant du pied, l'escargot déploie ses chairs comprimées : il a alors avancé d'un millimètre. En fait, le pied de l'escargot forme une dizaine de bourrelets qui se propagent simultanément vers l'avant. Ce mode de locomotion très coûteux en énergie permet à l'escargot, de faible masse, de se déplacer sur des supports parfois très accidentés.

Gastéropode ou amphibien ?

Jabba le Hutt se déplace en effectuant le même genre de mouvements, comme on peut le constater dans l'épisode IV, *Un Nouvel Espoir* de la saga *Star Wars*. Ce qui étonne en revanche, c'est qu'il puisse le faire en dépit de sa masse importante et sans production apparente de mucus. Sachant que son nom évoque le mot russe signifiant « crapaud », la question est donc posée : Jabba le Hutt est-il un gastéropode (mollusque) ou un amphibien (vertébré) ? Corps mou, gros yeux, peau plissée et verdâtre, est-ce une grosse limace munie de petits pseudopodes (« bras ») ou un énorme têtard de l'espace ? Quelles espèces ont bien pu inspirer George Lucas pour imaginer ce monstre verdâtre ? À défaut de disposer d'une radiographie de son corps ou de pouvoir le disséquer, contentons-nous de ses caractéristiques externes : Jabba mange de petites grenouilles en guise d'apéritif, ce qui n'est pas sans rappeler le cannibalisme de certains gros amphibiens. Le fait qu'il possède une langue visqueuse et des yeux à pupille (et non de simples ocelles) sont aussi des indices qui suggèrent que ses ancêtres sont des amphibiens.

Enfin, le fait que l'on voie une dame Jabba dans l'épisode I, *La Menace fantôme* (dans l'arène de la course des modules) nous fait penser encore une fois à un amphibien, car la distinction entre mâle et femelle est moins évidente chez les gastéropodes (l'escargot est hermaphrodite) que chez les amphibiens. Jabba serait donc plutôt un amphibien néoténique, c'est-à-dire ayant conservé des caractères larvaires, telle une queue ou l'absence de membres postérieurs, mais capable de se reproduire. Dès lors, on peut imaginer que la progéniture de Jabba se développe sous l'eau. Et quant à sa masse, qui doit être de l'ordre d'une tonne, elle impose qu'il soit quand même doté d'un squelette interne pour ne pas s'affaisser sous son propre poids. Espérons que les prochains épisodes de la saga nous renseigneront sur ces questions pour tester nos hypothèses ! ■

R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris.

ART & SCIENCE

Promenades dans un paysage de lumière

Deux artistes mêlant informatique, mathématiques et design graphique invitent les visiteurs à interagir avec la lumière dans dix installations : et l'on croit jouer avec du sable, marcher sur l'eau, gambader dans l'herbe…

Loïc MANGIN

L'Assemblée générale des Nations unies a décrété 2015 « année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière ». Elle l'est à plus d'un titre, car on commémore les 1 000 ans de *Kitab al-Manazir* (le *Traité d'optique*), l'ouvrage du physicien de Bassorah (Iraq) Al-Hasan Ibn Al-Haytham surnommé aussi Alhazen, le fondateur de l'optique moderne, et les 200 ans de la théorie d'Augustin Fresnel sur la nature ondulatoire de la lumière. Ajoutons qu'il y a 150 ans, James Clerk Maxwell formulait ses équations de l'électromagnétisme, dont la lumière est l'un des avatars. Le moment est donc bien choisi pour mettre la lumière sous le feu des projecteurs ! De fait, les manifestations destinées à célébrer la lumière sont innombrables.

Les artistes Adrien Mondot (informaticien et jongleur) et Claire Bardainne (plasticienne, designer et scénographe) ont choisi de célébrer la lumière à leur façon en en faisant la matière première de dix installations. Elles sont présentées au Palais de la Découverte, à Paris, dans le cadre d'une exposition nommée « XYZT, Les paysages abstraits », en référence aux quatres coordonnées nécessaires pour décrire le déplacement d'un point dans l'espace *(XYZ)* et le temps *(T)*.

Le visiteur est invité à s'immerger dans chacune des œuvres et à interagir avec elle. Au fil d'une promenade, il peut jouer avec du sable, poser sa main sur de l'eau, marcher dans un champ d'herbe, contempler un arbre balayé par le vent… Cependant, ces expériences sont transposées dans un univers numérique composé de points, de lignes et de lettres en lumière. Ces formes se mettent en mouvement sous l'effet d'un pas, d'un souffle ou d'un geste du spectateur qui est filmé dans de nombreuses installations par une caméra Kinect (initialement mise au point par Microsoft pour des consoles de jeux). On s'amuse alors avec une matière virtuelle issue du croisement de la création artistique et des mathématiques.

Détaillons-en quelques-unes. Dans *Anamorphose spatiale (a)*, on franchit une rivière dont l'image est fondée sur le procédé de l'anamorphose (déformation réversible effectuée à l'aide d'un miroir ou d'une opération mathématique). Quand on parcourt cette « étendue d'eau », la perspective est en permanence remodelée, ce qui entraîne la perception d'un relief mouvant à partir de simples lignes. Et l'on se prend à surfer sur les vagues et les ondulations.

Le visiteur s'amuse avec une matière virtuelle née du croisement de la création artistique et des mathématiques.

Après la rivière, place aux herbes hautes, bercées par une brise légère, du *Champ de vecteurs (b)*. En le traversant, on laisse une trace éphémère de son passage dans une non-matière. Ensuite, on peut choisir d'être « éparpillés par petits bouts, façon puzzle » avec *Nuées mouvantes (c)*. Ici, le corps du visiteur est dynamité, ventilé et dispersé en un ensemble de particules qui, projetées sur un écran, composent l'image de sa silhouette. De ses gestes, il pilote la forme et la trajectoire de cette sorte de vol d'étourneaux ou d'essaim d'abeilles qui le représente. Le reste est à découvrir sur place.

Derrière l'élégance de ces créations se cachent des mathématiques complexes dont on peut révéler quelques aspects. Bien sûr, des algorithmes sont cachés dans chacune des installations. Certaines exploitent la notion d'anamorphose, nous l'avons vu, d'autres le mouvement brownien, d'autres encore le bruit de Perlin, une technique qui augmente le réalisme apparent d'images de synthèse. Quant à *L'arbre à lettres (d)*, où des lettres-feuilles tombent sous les assauts du vent, cette œuvre exploite l'idée de L-système. Il s'agit d'un ensemble de règles qui, appliquées de façon itérative, reproduisent la croissance des plantes ou des colonies de bactéries : à chaque étape du processus, une même opération est effectuée sur les parties de la figure apparues lors de l'étape précédente.

Ces mathématiques sont néanmoins invisibles et seul restent le plaisir et la fascination de jouer avec la lumière, comme un chaton avec un point lumineux mobile ! ■

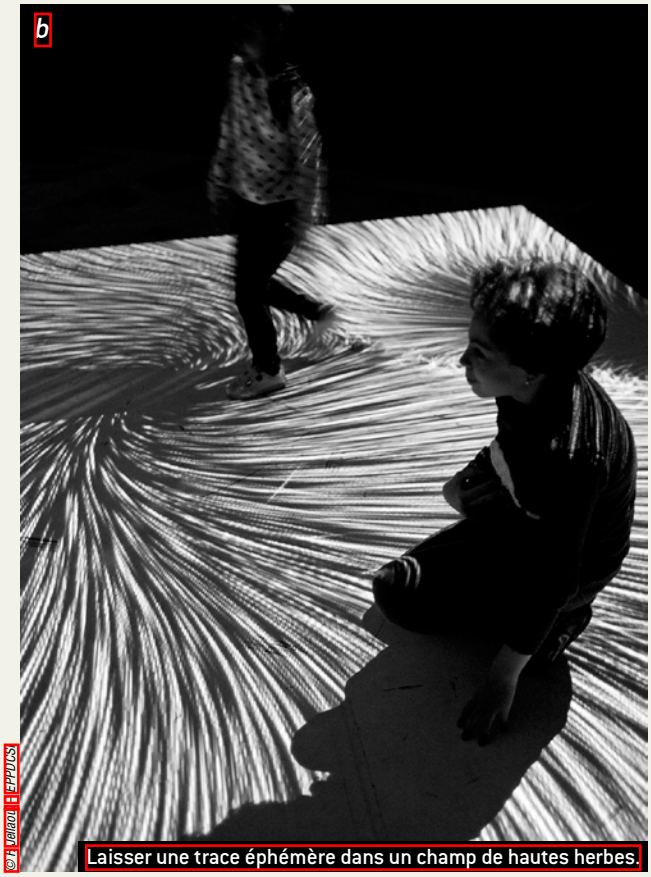
XYZT, Les paysages abstraits,
Palais de la Découverte, à Paris,
du 9 juin 2015 au 3 janvier 2016.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

a

©MA Ionda - EPFL/CS

Marcher sur l'eau d'une rivière de lumière.



b

©H Gilardi - EPFL/CS

Laisser une trace éphémère dans un champ de hautes herbes.

c

©Romain Etienne

Voir son corps «éparpillé façon puzzle».

d

©Romain Etienne

Suivre les feuilles d'un arbre à lettres soufflées par le vent.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

ruedesétudiants

JE SUIS ÉTUDIANT, JE M'ABONNE

21 GRANDS TITRES DE PRESSE À PRIX UNIQUE ET IMBATTABLE !

PRIX UNIQUE 39 € l'abonnement

Jusqu'à -77% de remise

PA15PLS

BULLETIN D'ABONNEMENT ÉTUDIANT

À renvoyer complété et accompagné de votre règlement, sous enveloppe non affranchie à :
RUE DES ETUDIANTS - LIBRE RÉPONSE 80402 - 21809 QUETIGNY CEDEX

Je suis étudiant(e) Filière ---------- Année d'étude ----------

COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ (1 OU 2 OU 3)

- ☐ Alternatives Economiques | Mensuel | 11 numéros + L'économie en 30 questions + accès illimité à alternatives-economiques-education.fr
- ☐ Beaux Arts magazine | Mensuel | 15 numéros
- ☐ Capital/Management | Mensuels | 8 numéros de Capital et 8 numéros de Management
- ☐ Cercle Psy | Trimestriel | 8 numéros
- ☐ Courrier international | Hebdomadaire | 32 numéros
- ☐ Grande Galerie | Trimestriel | 8 numéros
- ☐ Harvard Business Review | Bimestriel | 3 numéros
- ☐ L'Eco | Hebdomadaire | 34 numéros
- ☐ L'Obs | Hebdomadaire | 26 numéros
- ☐ Le Monde Sélection hebdomadaire | Hebdomadaire | 39 numéros
- ☐ Le Monde diplomatique | Mensuel | 9 numéros
- ☐ Le 1 | Hebdomadaire | 39 numéros
- ☐ Les Inrockuptibles | Hebdomadaire | 26 numéros
- ☐ National Geographic | Mensuel | 12 numéros
- ☐ Philosophie magazine | Mensuel | 9 numéros
- ☐ Pour la Science | Mensuel | 10 numéros
- ☐ Sciences Humaines | Mensuel | 11 numéros
- ☐ Télérama | Hebdomadaire | 32 numéros
- ☐ Time | Hebdomadaire | 38 numéros
- ☐ Vocable | Bimensuel | 21 numéros + 1 hors-série

☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol (cochez l'édition choisie)

TOTAL DE MA COMMANDE (COCHEZ UN DE CES 3 CHOIX)

☐ 1 abonnement → 39 € ☐ 2 abonnements → 69 € ☐ 3 abonnements → 99 €

Nom ----------

Prénom ----------

Adresse (France métropolitaine seulement) ----------

Code Postal ____ Ville ----------

E-mail ----------

☐ J'accepte de recevoir des offres de Rue des Etudiants

☐ J'accepte de recevoir des offres des partenaires de Rue des Etudiants

Téléphone ____ ____ ____ ____ ____

Je règle la somme de ☐ 39 € ☐ 69 € ☐ 99 € par :

☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants ☐ Carte bancaire

N° ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____ ____

Date d'expiration ____ ____ ____ ____

Cryptogramme (Les 3 derniers chiffres au dos de votre carte.) ____ ____ ____

Date et signature obligatoires :

Les informations susvisées que vous nous communiquez sont nécessaires au traitement de votre abonnement. Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée par la loi du 6 août 2004, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant en adressant un courrier à Rue des Etudiants. Ces données pourront être cédées à des organismes extérieurs, sauf opposition écrite de votre part à l'adresse susmentionnée.

Abonnez-vous encore plus vite sur www.ruedesetudiants.com

IDÉES DE PHYSIQUE

Comme un oiseau… sur un câble électrique

Toucher une ligne à haute tension est sans danger à condition d'être électriquement isolé et petit ou recouvert d'une couche conductrice.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Qui ne s'est pas demandé « Pourquoi ne s'électrocute-t-il pas ? » en voyant un oiseau perché sur un fil à haute tension ? Nous avons tendance à répondre que, puisque l'oiseau ne touche pas la terre, le circuit électrique n'est pas fermé et, partant, le courant ne passe pas dans son corps. Il faut cependant se méfier des évidences : cette réponse n'est valable que pour du courant électrique continu !

En réalité, tel un condensateur, l'oiseau se charge et se décharge périodiquement au rythme des oscillations du courant alternatif de la ligne. Comme nous le verrons, c'est grâce à sa petite taille que le courant qui traverse ses pattes ne constitue pas un danger. Et il en est tout autrement pour les électriciens qui réparent les lignes à haute tension : il doivent non seulement être isolés, mais aussi se protéger de ces cycles charge-décharge au moyen d'une tenue conductrice.

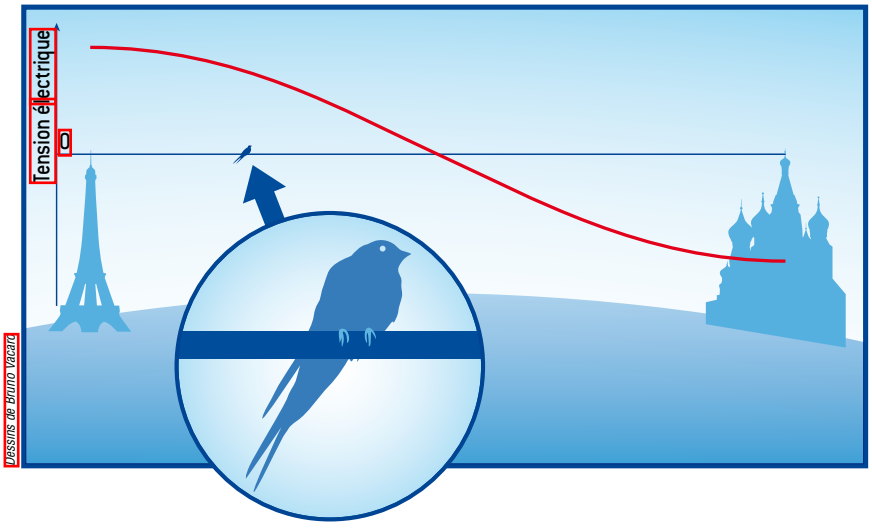
Ne pas dépasser quelques milliampères

Pour commencer, quels sont les effets d'un courant électrique sur les organismes vivants ? De nombreux travaux, sur l'homme ou des animaux, fournissent des seuils approximatifs. Le plus petit courant perceptible provoque, en stimulant les cellules nerveuses, une légère sensation de picotement ; il est de l'ordre de 1,1 milliampère chez l'homme et 0,7 milliampère chez la femme (valeur « efficace » d'un courant sinusoïdal de 60 hertz).

Au-delà d'une certaine intensité, le courant provoque des contractions musculaires spontanées. La valeur maximale pour laquelle une personne qui tient fermement un fil peut encore le relâcher, malgré les contractions de ses muscles, est une quinzaine de fois supérieure au seuil de picotement, soit 16 milliampères chez l'homme. Des courants plus importants provoquent des fibrillations ventriculaires, un arrêt cardiaque et sont fatals. Extrapoler ces valeurs aux oiseaux est téméraire, mais nous les prendrons tout de même comme repères.

POUR INTERVENIR SUR UNE LIGNE À HAUTE TENSION sans risquer sa vie, l'électricien porte une combinaison conductrice. Quand ses mains s'approchent du câble, de petites décharges ou « aigrettes » se produisent à travers l'air ionisé entre le câble et le gant *(à gauche)*. Lorsque le contact avec le câble est établi, les échanges de charges se poursuivent en raison de la nature alternative de la tension *(à droite, flèches)*. La combinaison forme une cage de Faraday : les charges électriques se répartissent à sa surface, et aucun courant associé ne traverse le corps du réparateur. Un oiseau n'a pas besoin d'une telle protection : grâce à sa petite taille, les courants qui le parcourent sont de faible intensité.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015



Dessins de Bruno Vacaro

À TOUT INSTANT, le long d'une ligne de courant alternatif à 50 hertz, la tension varie selon une sinusoïde très étalée, dont la demi-longueur d'onde est d'environ 3 000 kilomètres *(en rouge)*. En raison de cette variation spatiale, les deux pattes de l'oiseau ne sont pas tout à fait au même potentiel électrique. Un courant associé parcourt l'oiseau, mais son intensité est négligeable, la différence de potentiel étant très faible.

Examinons les cas de l'oiseau perché sur le fil et de l'électricien réparateur. Ce dernier ne doit bien sûr pas être relié au sol : selon l'environnement et le type de tension, il accède à la ligne soit à l'aide d'une nacelle isolée, soit par hélicoptère. Mais contrairement à l'oiseau, tout son corps à l'exception du visage est recouvert d'une tenue conductrice, en général une combinaison tissée en fil d'argent et incluant gants et bottes. Pourquoi ?

Sur les lignes à très haute tension, on dépasse les 100 000 volts : en France, elles sont à 400 000 volts pour le transport et à 225 000 volts pour la répartition. Lorsqu'un oiseau entre au contact de la ligne, il se comporte comme un condensateur sur lequel on branche un générateur : il se charge électriquement. Il en est de même pour l'électricien réparateur.

Ainsi, lors du premier contact, l'oiseau, initialement neutre, va se charger. La situation est inverse à ce qui se passe lorsque, après avoir marché sur un tapis, nous nous sommes chargés d'électricité statique : quand nous touchons un objet métallique, nous ressentons une petite décharge qui picote, dû au transfert de charge assurant l'égalisation entre notre potentiel électrique et celui de l'objet. En pratique, ce qui compte, c'est le saut de potentiel qu'il faut réaliser, soit pour se charger, soit pour se décharger.

Dans les situations domestiques, notre potentiel peut atteindre quelques dizaines de kilovolts par temps sec. Cette valeur est du même ordre que celle des lignes à haute tension. Mais pour réparer des lignes à très haute tension, on s'expose à une charge dix fois supérieure. Autrement dit, pour un humain, on quitte le domaine de la petite décharge pour une bonne secousse.

Qui plus est, comme le courant est alternatif, cette tension oscille 50 fois par seconde. Par conséquent, l'oiseau ou l'électricien vont se charger alternativement positivement et négativement. Quelles sont les charges et les intensités de courant mises en jeu ?

Afin de les déterminer, simplifions la géométrie en considérant que les organismes sont… sphériques ! La capacité électrique d'une sphère isolée dans l'espace est égale au produit de son rayon, de la permittivité électrique du vide et d'un facteur géométrique 4π. Il s'ensuit que la capacité d'une sphère de un mètre de diamètre est de l'ordre de un vingtième de nanofarad (5×10^{-11} farad). La charge étant égale au produit de la capacité par la tension, on en déduit qu'un homme en contact avec une ligne à 400 000 volts recevrait une charge d'environ 25 microcoulombs, tandis que l'oiseau, dix fois plus petit, recevrait une charge de 2,5 microcoulombs. C'est cette charge qui est à l'origine de la petite étincelle lors du premier contact avec la ligne.

Taille plus petite, courants plus faibles

La tension ayant une fréquence de 50 hertz, la charge passe 50 fois par seconde d'une valeur positive à une valeur négative. L'amplitude de sa variation est donc de 60 microcoulombs pour l'électricien, et cette variation a lieu, dans un sens et dans l'autre, 100 fois par seconde. Le courant correspondant est donc de l'ordre de 5 milliampères.

Pour l'oiseau, ce courant est inférieur au milliampère, ce qui est sans doute négligeable et à peine ressenti. Pour l'électricien, en revanche, une intensité de 5 milliampères est dangereuse. C'est pourquoi il porte une combinaison conductrice faisant office de cage de Faraday : les charges se répartissent sur cette surface conductrice, sans pénétrer dans le corps.

Cette combinaison protège aussi les électriciens de l'« effet Corona ». Les très

LES AUTEURS

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

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

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

hautes tensions sont en effet à l'origine d'une ionisation partielle de l'air et de courants électriques supplémentaires au voisinage de la ligne – que nous entendons sous forme de grésillements. Cet effet peut provoquer de petites aigrettes comme dans les feux de Saint-Elme, notamment quand l'électricien approche sa main gantée de la ligne *(voir la figure page 89)*. Sa combinaison évite qu'il reçoive ces courants d'une autre nature.

Pour un oiseau, qui n'a pas de combinaison protectrice, un autre effet pourrait intervenir. Dans les lignes de transmission en courant alternatif, la tension le long de la ligne dessine à chaque instant une courbe sinusoïdale *(voir la figure page ci-contre)*. Par conséquent, les deux pieds du volatile ne sont pas au même potentiel. Cette différence, qui crée un courant à travers le corps de l'animal, est-elle dangereuse ?

Lors d'un orage, si l'on se trouve debout près d'un arbre touché par la foudre, la différence de potentiel entre les deux pieds (liée à la circulation des courants dans le sol) peut dépasser le kilovolt, d'où un fort risque d'électrocution pour les humains et surtout pour les quadrupèdes comme les vaches, dont les pieds sont plus écartés.

Sur une ligne à haute tension, heureusement, la fréquence de la tension alternative est basse, d'où une longueur d'onde gigantesque : près de 6 000 kilomètres. En ordre de grandeur, la différence de potentiel entre les deux pattes de l'oiseau est égale à la tension du courant multipliée par le rapport distance entre pattes/longueur d'onde. Pour une ligne à 400 000 volts, on trouve alors une minuscule différence de potentiel, de quelques millivolts au plus. Pas de quoi griller le volatile ! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. A. Redinz, **Birds on power lines**, *American Journal of Physics*, vol. 82, pp. 691-694, 2014.

G. Stix, **Working hot : life at 765 kV**, *IEEE Spectrum*, vol. 25(9), pp. 54-56, 1988.

Neurodiététique
Connaître son cerveau pour mieux manger

Pourquoi faut-il connaître son cerveau pour mieux manger ? D'abord pour le nourrir convenablement. Ensuite pour éventuellement perdre quelques kilos : suivre un régime est inéluctablement voué à l'échec si on n'a pas compris le fonctionnement de ses neurones. Enfin pour apprécier, à sa juste valeur, le plaisir de manger.

96 pages - 7,50€

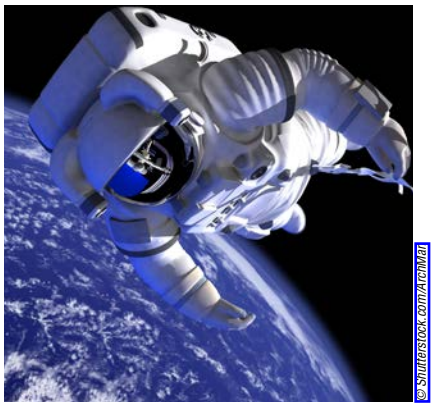
Disponible en kiosque
et sur **www.cerveauetpsycho.fr**

QUESTION AUX EXPERTS

Qu'arriverait-il sans combinaison dans l'espace ?

Rien d'agréable, mais nous n'exploserions pas ni ne gèlerions en quelques secondes !

Roland LEHOUCQ



© Shutterstock.com/Arcnimal

Dans le film *Outland* (1981), des ouvriers explosent après avoir ouvert leur scaphandre dans l'espace. Dans *Mission to Mars* (1999), un astronaute relève sa visière et gèle en quelques dizaines de secondes. Nombre d'autres œuvres illustrent ce que nous savons tous : l'espace est un milieu plutôt hostile.

De fait, le sort de l'insouciant promeneur spatial qui sortirait en tenue d'été ne serait pas très enviable. L'absence d'air est le premier problème pour un humain subitement exposé au vide. En effet, le cerveau se retrouve vite à court d'oxygène, qui s'échappe du sang en raison de la faible pression ambiante. Cela entraîne une perte de conscience en une quinzaine de secondes et, peu après, la mort.

Par ailleurs, la pression régnant à l'intérieur du corps, égale à celle de l'atmosphère avant la sortie dans le vide spatial, devient très supérieure à celle du milieu extérieur, quasi nulle. D'où l'idée que le naturiste de l'espace exploserait aussitôt.

En réalité, les tissus, notamment la peau, sont assez résistants pour s'accommoder d'une telle surpression. Le corps n'explose donc pas, mais il gonfle bel et bien. C'est ce qu'a constaté le pilote américain Joe Kittinger, qui a atteint l'altitude record de 30 480 mètres lors d'un vol en ballon en 1960. Durant l'ascension, le gant droit de sa combinaison s'est percé. Sa main a doublé de volume, en raison de la faible pression externe. Elle est revenue à la normale quelques heures après l'atterrissage.

À l'intérieur du corps, c'est une autre histoire. Les vaisseaux sanguins les plus fins peuvent éclater. La dilatation de l'air interne met certains organes à rude épreuve : elle endommage gravement les alvéoles pulmonaires (de petits « sacs » où se déroulent les échanges gazeux avec le sang) et menace les tympans. Le diaphragme risque d'être poussé vers le haut par l'expansion des gaz piégés dans l'estomac. Une carie ou un plombage mal réalisés peuvent aussi contenir de petites poches d'air, dont la dilatation causerait de vives douleurs, voire l'éclatement de la dent.

Liquides en ébullition

Outre la dilatation de ses gaz, l'ébullition de ses liquides menace le spationaute déshabillé. La température d'ébullition dépend en effet de la pression. Au sommet du mont Blanc, où la pression est deux fois moindre qu'au niveau de la mer, l'eau bout à seulement 85 °C. Placé dans le vide, un liquide bout quelle que soit sa température. C'est ce qu'illustre la mésaventure vécue en 1965 par le porteur d'une combinaison pressurisée, testée dans une chambre à vide du centre spatial Johnson de la Nasa, au Texas. La combinaison s'est accidentellement percée et son porteur a perdu conscience en 14 secondes. Une fois la pression de la chambre revenue à la normale, il a fini par retrouver ses esprits sans dommage. Au débriefing, il a rapporté que son dernier souvenir conscient était l'ébullition de sa salive !

Heureusement, le cas du sang est différent : pompé par le cœur, il est toujours en surpression par rapport à l'extérieur. Tant que le cœur bat, le précieux liquide n'entre pas en ébullition à l'intérieur du corps humain.

À l'inverse, l'intrépide aventurier qui bondirait du vaisseau spatial sans combinaison se transformerait-il instantanément en Mr Freeze ? Exposé au vide, il perdrait de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Il éprouverait une sensation de froid, amplifiée par l'évaporation de la sueur à la surface de sa peau : le changement d'état de l'eau consomme de l'énergie, au détriment du corps. L'infortuné finirait par geler, mais certainement pas en moins d'une minute comme dans *Mission to Mars* ! Dans un air hivernal glacé, où le vent et l'humidité renforcent les pertes thermiques, la congélation d'un corps humain prend des heures. Dans le vide, où seul le rayonnement agit, il faut encore plus longtemps.

Si les humains meurent vite dans l'espace, d'autres animaux sont capables d'y survivre. Ainsi, des tardigrades, de minuscules animaux proches des arthropodes, sont rentrés sains et saufs après une exposition prolongée au vide orbital. On comprend encore mal leur résistance et nous avons beaucoup à en apprendre sur l'adaptation au vide. Peut-être seront-ils, avant les humains, les premiers voyageurs interstellaires ? ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

SCIENCE & GASTRONOMIE

La cerise dans le gâteau

Dans un clafoutis traditionnel, les fruits, moins denses que la préparation dans laquelle ils baignent, montent en surface. Leur farinage ne fait rien à l'affaire !

Hervé THIS

La question des fruits qui sédimentent ou remontent dans les gâteaux a suscité d'innombrables « précisions culinaires », ces idées populaires que l'on s'est longtemps transmises sans justification. Ainsi, pour éviter que les fruits ne tombent au fond des préparations ou se retrouvent en surface, il faudrait les fariner et les placer la veille dans la préparation, avant de cuire. Voire !

Commençons par les résultats expérimentaux. D'abord, les cerises peuvent-elles être farinées efficacement ? Les cerises semblent être des fruits très lisses, sur lesquels rien ne semble devoir adhérer. L'expérience qui consiste à plonger des cerises dans de la farine et d'autres dans du sucre montre que le farinage se fait bien. Nous savons qu'une goutte d'eau déposée sur de la farine roule : la farine, dont les grains sont entourés de lipides, est plutôt hydrophobe, comme la cire des cuticules, d'où l'efficacité du farinage.

Puis nous avons préparé des clafoutis, en mêlant des œufs, du lait, du sucre, de la farine, selon les proportions idoines. Dans cette préparation, nous avons placé des cerises et observé qu'elles se disposaient en surface (elles flottaient) avant la cuisson ; aussi se trouvaient-elles dans la partie supérieure des clafoutis après la cuisson.

Le farinage contrecarre-t-il cette remontée des fruits ? Nous avons divisé le moule en deux moitiés par une cloison, et déposé des cerises farinées d'un côté de la cloison et des cerises non farinées de l'autre côté. Nous avons versé la préparation pour clafoutis sur les fruits, puis enfourné le gâteau. Après cuisson, les fruits étaient tous dans la partie supérieure des deux compartiments : les cerises, farinées ou non, avaient toutes monté vers la surface.

Pourquoi les cerises avaient-elles une densité inférieure à celle des préparations ? En première approximation, une cerise est faite d'eau et de sucre, tout comme l'appareil à clafoutis, dont l'eau est apportée par le lait et l'œuf. La farine, plus dense que l'eau comme le prouve l'expérience consistant à en verser dans de l'eau pure, augmente la densité du gâteau. Il en est de même des protéines de l'œuf (un œuf frais tombe au fond d'une bassine pleine d'eau).

L'œuf et la farine influent ainsi sur la densité de la pâte, mais considérons d'abord la question de la concentration en sucre. Si nous préparons deux sirops de sucre, l'un léger et l'autre très concentré, nous pouvons observer que les cerises entières, avec noyau, sédimentent dans le sirop léger, mais flottent dans le sirop concentré.

Quelle est l'influence du noyau ? Si nous préparons un sirop de concentration telle que des cerises entières, avec noyau, soient de même densité, alors on voit que des cerises dénoyautées coulent et que les noyaux, au contraire, flottent : les noyaux, moins denses que les cerises, augmentent la flottabilité.

En fin de compte, sauf pour des préparations de gâteaux si visqueuses que tout mouvement est impossible, la question de la sédimentation éventuelle des fruits se ramène donc à une question de densité, et non de farinage. On observera que des fruits confits sont bien plus concentrés en sucre que des fruits frais : leur densité est donc supérieure et ils sédimentent.

Lors de la cuisson, plusieurs phénomènes peuvent, toutefois, modifier leur position. D'une part, des cerises ou des fruits confits pourraient être emportés par les mouvements de la préparation lors de la cuisson et redistribués dans le gâteau, mais ce n'est pas le cas ici.

D'autre part, l'évaporation joue un rôle. Nous avons examiné l'évaporation de l'eau, liquide qui fait partie de la préparation : elle est d'environ 10 % pour de l'eau pure. Ainsi, la concentration d'un sirop ou d'une préparation pour gâteaux change avec la cuisson. Des fruits qui sédimentaient peuvent se mettre à flotter, la densité du gâteau ayant augmenté. L'inverse – une diminution de la densité de la pâte – n'aura pas lieu, sauf si la préparation a été foisonnée par incorporation d'air, ou si elle se gonfle de bulles de vapeur, formée par l'évaporation de l'eau de la préparation pour le gâteau, au contact du fond du moule.

Finalement, la clef du mystère tient en un mot : densité ! ■

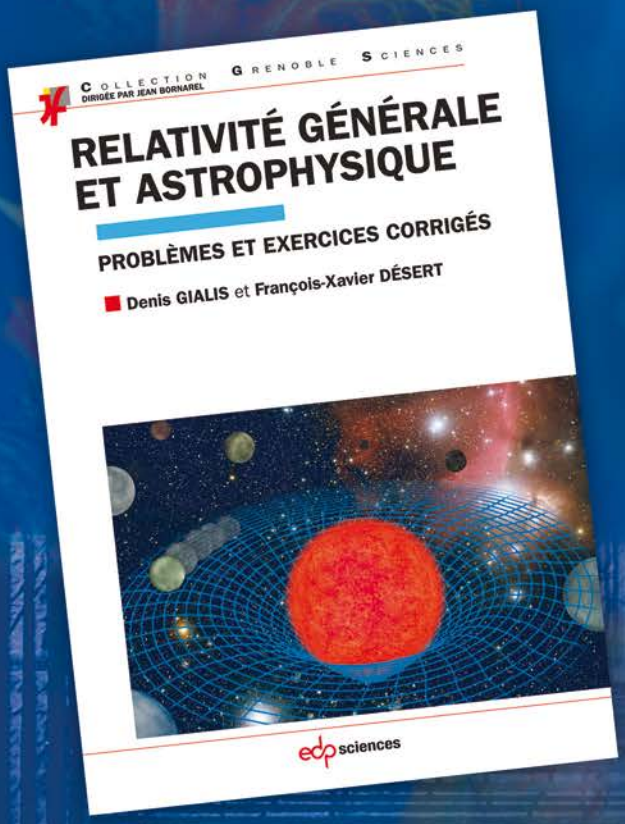
Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science& culture alimentaire (Académie des sciences).

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

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION



■ **Comprendre la relativité générale par la pratique du calcul**

■ **... et d'autres titres de la collection *Grenoble Sciences***

www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES

POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet : *laboutique.edpsciences.fr*

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 – Fax. (33)4 76 51 45 79
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

■ BIOLOGIE ANIMALE

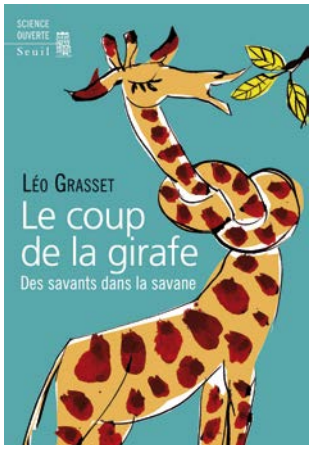
Le Coup de la girafe

Léo Grasset

Seuil, 2015
(144 pages, 15 euros).

Dans ce livre, l'auteur nous parle de l'écologie des animaux sauvages d'un point de vue évolutif. Et dans quel milieu puiser davantage d'exemples lumineux, sinon dans la savane africaine ? C'est à la suite d'une expérience de terrain dans le parc national Hwange, au Zimbabwe, que le jeune auteur a décidé de nous narrer « le coup de la girafe ».

Tout chercheur ayant travaillé en Afrique (c'est mon cas) vous dira que la savane est un terrain de jeu à nul autre pareil pour étudier les comportements animaux et tester les hypothèses les plus variées, même si elles sont parfois saugrenues. Dans ce livre, l'auteur explore d'abord les bizarreries morphologiques apparues chez certaines espèces au cours de l'évolution. Depuis le côté *a priori* incongru de l'appareil génital des hyènes femelles jusqu'à l'utilité douteuse des rayures du zèbre, Léo Grasset met en évidence la diversité des hypothèses scientifiques ayant été proposées et testées au fil du temps. Face à ces énigmes de la nature, les chercheurs ont développé de nombreuses théories, que l'auteur nous présente ici non sans humour. On appréciera particulièrement ses révélations chocs sur le célèbre film *Le Roi Lion*. Autant dire que, de par son style libre et agrémenté de références culturelles actuelles, ce livre pourra trouver un écho auprès des jeunes et, pourquoi pas, susciter des vocations scientifiques.



Dans la dernière partie, l'auteur retrace l'évolution de *Homo sapiens* en Afrique encore, puisque c'est le berceau de notre espèce. À travers plusieurs exemples, nous découvrons que la relation qu'entretiennent les humains avec les animaux de la savane est complexe, et peut être à la fois néfaste et bénéfique aux espèces. *H. sapiens* n'est pas une espèce supérieure aux autres ou plus puissante : il fait tout simplement partie lui aussi de l'environnement. Ce livre nous rappelle donc que notre espèce a toujours eu un fort impact sur la nature, et que cet impact n'a jamais été plus grand qu'aujourd'hui. Avec cette idée en tête, le rôle essentiel des humains dans la protection et la sauvegarde des espèces sauvages apparaît alors comme une évidence.

Sophie Grange-Chamfray
Société zoologique de Londres

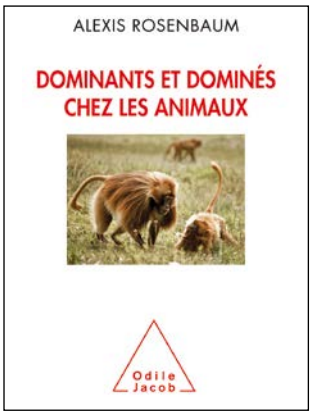
■ ÉTHOLOGIE

Dominants et dominés chez les animaux

Alexis Rosenbaum

Odile Jacob, 2015
(184 pages, 22,90 euros).

La vision traditionnelle des hiérarchies animales s'appuyait sur un totalitarisme des mâles dominants, plus costauds que les autres. Les récents travaux de l'éthologie, que relate le présent ouvrage, nuancent beaucoup cette interprétation.



Chez les vertébrés, les hiérarchies animales sont en effet beaucoup plus souples et laissent place, au-delà des rapports de force, à une dominance exercée parfois par les plus faibles, mais plus expérimentés. La hiérarchie, qui peut changer, vise à la paix sociale et un groupe hiérarchisé vit mieux. Du coup, la hiérarchie résulte souvent d'intérêts égoïstes des sujets qui la pratiquent, mâles comme femelles.

Les relations de dominance, qui certes incluent parfois la force physique, résultent beaucoup plus souvent, particulièrement chez les primates, d'un apprentissage, « de l'expérience personnelle de l'animal autant que de ses prédispositions innées ». La confiance en soi a plus d'importance que la carrure. Elle peut relever de jeux complexes d'alliance entre les animaux ou du statut social de la mère. Il existe bien sûr chez les animaux des rapports violents, encouragés par les espaces trop exigus et la réduction de ressources, et des sociétés totalitaires où le despote bénéficie d'un meilleur statut, d'une meilleure santé et d'un plus grand accès aux femelles. Mais ces situations ne constituent pas la généralité, ni ne témoignent d'un fonctionnement rigide sans oppositions.

Dans ce superbe livre, seul le titre, qui réfère aux « animaux », reste ambigu. Comme le rappelle l'introduction, le livre traite presque exclusivement des vertébrés, dont l'espèce humaine a partagé l'évolution vers davantage d'encéphale et d'individualité. Mais des hiérarchies rigides existent dans les sociétés d'insectes, plus proches de leurs bases génétiques. Même si l'on ne peut transférer un constat naturaliste à des valeurs morales, on doit reconnaître que les hiérarchies souples, voire notre souhait d'égalité sociale, prennent leurs racines dans notre héritage de vertébrés.

Georges Chapouthier
Chercheur émérite au CNRS, Paris

■ GÉOGRAPHIE

Submersion

Laurent Labeyrie

Odile Jacob, 2015
(176 pages, 21,90 euros).

L'auteur vise ici à faire comprendre le fonctionnement du milieu littoral afin de montrer quelle voie il faudra suivre étant donné la montée des eaux océaniques.

Laurent Labeyrie décrit ainsi la submersion progressive du golfe du Morbihan après la stabilisation du niveau marin il y a 8000 ans, sous l'effet de l'abaissement du milieu continental. Il en souligne les preuves avec les foyers submergés du cromlech de l'îlot d'Er Lannic et avec les anciennes souches d'arbres qui affleurent lors des grandes basses mers près de l'île de Sarzeau.

À partir de cet exemple, il aborde un tableau plus général de l'isostasie – à laquelle il consacre un encadré – en décrivant entre autres l'enfoncement des volcans du Pacifique. Il traite aussi des variations du niveau de la mer, en mentionnant les mesures isotopiques des

© Pour la Science - n° 455 - Septembre 2015

foraminifères benthiques, qui témoignent d'une montée très rapide du niveau marin, dépassant le mètre par siècle.

L'auteur s'intéresse tout particulièrement aux relations entre civilisations humaines passées et anciens climats associés à des niveaux marins différents. Il aborde ensuite la prise en compte tardive de la montée actuelle du niveau de la mer, phénomène dont il analyse les preuves scientifiques, fournies notamment par les techniques d'altimétrie spatiale.

Laurent Labeyrie applique la méthode de l'observation directe, intime, dans une « balade sur les côtes de Bretagne » qui ont beaucoup évolué depuis sa jeunesse ; il s'attache alors particulièrement à la commune d'Arzon dont il a été conseiller municipal de 2008 à 2014. Il utilise cet exemple pour prôner plus généralement une réaction pragmatique face au réchauffement et à la montée du niveau de la mer.

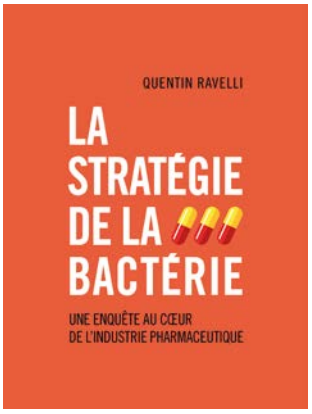
Rédigé par un chercheur au CNRS, coauteur du chapitre « océans et niveau de la mer » du rapport du GIEC, mais aussi connaisseur intime de la côte de Bretagne, ce livre présente un grand intérêt à l'heure où l'on s'interroge sur les effets des submersions marines.

Fernand Verger
Géographe émérite à l'ENS, Paris

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

La Stratégie de la bactérie

Quentin Ravelli
Seuil, 2015
(368 pages, 23,50 euros).



De même qu'une bactérie développe une résistance aux atteintes extérieures, l'industrie pharmaceutique développe des stratégies d'adaptation face aux agressions de son environnement, qu'il s'agisse de difficultés économiques, de contraintes réglementaires ou de contestations sociales et politiques. Voilà l'analogie proposée par l'auteur de cet essai afin d'expliquer pourquoi, malgré des pressions toujours plus fortes, l'industrie pharmaceutique reste l'une des activités économiques les plus profitables qui soient.

L'ouvrage est précis et documenté. Il est issu d'une thèse, mais surtout de quatre années d'enquête de terrain, depuis les cabinets médicaux jusqu'aux usines de production et d'emballage, en passant par les services de marketing. Pour autant, il s'adresse à un public large et sa lecture demeure claire et agréable.

L'auteur dresse par exemple la « biographie sociale » d'un antibiotique fortement prescrit, produit par l'un des plus importants groupes pharmaceutiques. Il montre, entre autres, comment les visiteurs médicaux ont dû « apprivoiser » les médecins pour faire glisser les prescriptions depuis les atteintes cutanées jusqu'à la sphère ORL, ou comment la gestion de la production du médicament sert à flouter les coûts pour en légitimer le prix élevé. Il étudie le « conflit d'intérêt permanent » qui s'est installé dans le monde de la recherche et de l'évaluation et comment la formation des médecins, le financement de la recherche et l'expertise, délaissés par l'État, dépendent intrinsèquement de l'industrie sur les plans intellectuel, financier et organisationnel.

Dans cet univers où tous les acteurs sont liés, n'émergent du conflit d'intérêt que l'aspect strictement juridique et les collusions économiques explicites. L'aspect moral, qui appelle à exclure *a priori* la participation à des activités aux intérêts en principe incompatibles, en est ainsi occulté.

Au-delà de l'objet même du livre, il s'agit ici d'illustrer que, face au capitalisme mondialisé, les valeurs de la démocratie se réduisent à un « supplément d'âme ». L'auteur de cet intéressant essai nous offre une analyse matérialiste qui dévoile la confusion entre valeur d'échange et valeur d'usage de la marchandise. Même si ce schéma semble parfois plaqué, son argumentation est convaincante.

Josquin Debaz
EHESS, Paris

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

Au pays de Numérix

Alexandre Moatti
PUF, 2015
(180 pages, 14 euros).

Numérix est un « petit pays gaulois »... Ce terme loufoque concentre la critique d'Alexandre Moatti contre la politique numérique française. Mues par leurs *a priori* contre toute pratique américaine, nos autorités lancent à grands sons de trompette des procédures rivales qui coûtent cher et finissent aux oubliettes. En France, le partenariat public-privé sur Internet favorise le privé au détriment du public encore plus qu'aux États-Unis. L'auteur plaide pour un humanisme numérique : diffusion des connaissances sur Internet, et confiance en nos pairs dans l'utilisation de cet outil.

La Fin d'un grand partage

Pierre Charbonnier
CNRS Éditions, 2015
(314 pages, 25 euros).

L'opposition, ou selon le mot de l'auteur, le « partage » entre nature et culture est obsolète. Il est devenu évident pour chacun que l'humanité fait partie de la nature, tandis qu'il est dans la nature humaine de développer des cultures. Dès lors, quels concepts mobiliser pour penser la transformation des rapports de la société à la nature ? Après avoir relu Descola, Durkheim, Lévi-Strauss et Latour sur les rapports de la société avec le naturel, l'auteur, anthropologue, les analyse pour mettre en évidence leurs transformations et esquisse ce qui devrait être le programme d'une philosophie politique de la nature.

L'Univers à portée de main

Christophe Galfard
Flammarion, 2015
(444 pages, 19,90 euros).

Pour nous faire découvrir l'Univers, l'auteur suppose notre esprit doué non seulement de vision, mais d'une forme d'agilité le rendant capable de se déplacer dans le cosmos. Il transforme ainsi tout voyage exploratoire dans l'espace, vers ses régions lointaines, au sein du monde quantique ou aux origines de l'espace et du temps, en campagnes d'observation sensibles et vivantes.

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

VÉLOBSERVATIONS

Bilan de mes expériences à vélo cet été. D'abord, monter une côte n'est pas fatigant. En effet, un phénomène s'est produit chaque fois que je l'ai fait : sitôt arrivé au sommet, j'ai pu accélérer vivement. Preuve que grimper donne de l'énergie.

Ensuite, pédaler ralentit le vélo. Quand je suis allé à l'Alpe d'Huez, j'ai pédalé, et j'ai avancé lentement. Quand j'en suis revenu, je n'ai pas pédalé, et j'ai foncé.

Observations faites en ville. À Bordeaux, les vélos en libre-service s'appellent V^3 – ce qui ne se lit pas « V au cube », mais V CUB (Communauté urbaine de Bordeaux). J'ignore comment se pratique l'opération, symbolisée par la notation V^3, consistant à effectuer la

multiplication réitérée d'un vélo par lui-même. Je ne sais pas non plus pourquoi tant de villes recourent à des jeux de mots : Vélo'V (Lyon), VélôToulouse, Vélhop (Strasbourg), VéloCité (Mulhouse, Besançon), etc.

Trêve de plaisanterie. Rappelons un principe de physique fameux chez les cyclistes : moins tu pédales plus fort, plus tu roules moins vite.

LE VRAI DU FAUX

Un mythologue, un sociologue, seraient mal inspirés de refuser de s'intéresser à un récit ou à une rumeur sous prétexte qu'ils sont faux. Du moment qu'un peuple colporte le récit ou la rumeur, ceux-ci sont instructifs.

En psychologie, le faux peut avoir le même effet que le vrai. Le souvenir d'avoir eu une enfance malheureuse peut meurtrir, même si c'est une reconstruction erronée.

En étymologie, le faux se mue parfois en vrai. Par exemple, il est vrai que « fainéant » est d'un registre plus soutenu que « feignant ». Mais cela résulte d'une erreur. La première forme attestée est « feignant », participe présent de « feindre », dont le sens ancien était « se dérober à la tâche ». Le sens ancien ayant cessé d'être compris, l'altération populaire « fainéant » s'est imposée parce que tout le monde entend « fait néant ». Le mot « fainéant » doit donc sa légitimité de mot soutenu à une étymologie infondée.

La mythologie, la sociologie, la psychologie, l'étymologie, sont perverses avec ceux qui les étudient. Ils doivent accorder autant d'attention aux affabulations qu'aux vérités. Mais si eux fabulent dans leurs analyses, ils perdent tout droit à l'attention des lecteurs.

DOUBLES INCONNUES

Problème. Prévoir comment vont évoluer au cours du temps les effectifs d'espèces naturelles interagissant sur un territoire donné. Méthode. Considérer ces effectifs comme des inconnues reliées par des équations exprimant les interactions entre les espèces. Puis tenter de résoudre le système d'équations ainsi obtenu.

Seulement, on n'est jamais sûr qu'il n'y a pas d'autres espèces interagissant, sans qu'on le sache, avec celles qu'on prend en compte. La nature joue souvent des tours de ce genre. Si difficiles soient les calculs sur les inconnues repérées comme telles, il y a donc plus difficile encore : découvrir quelles inconnues sont restées... dans l'inconnu.

QUAND LES MOTS SE JOUENT DE NOUS

Des gens qui s'imposent sans jamais se sentir importuns, formulent toujours les mêmes exigences, insistent sans percevoir de limite à ne pas dépasser, on dit qu'ils sont lourds. De fait, ils agissent comme la pesanteur. Cette dernière s'impose à tous les instants de notre vie. Jamais elle ne se fait discrète. Que notre attention se relâche, et elle en profite toujours de la même façon : elle provoque une chute – grave ou amusante, peu lui importe. La loi de la pesanteur s'applique à elle-même : elle est lourde !

Nos mots ne sont jamais exacts. Sentiments éthérés, mots patauds. Sentiments vulgaires, mots délicats. Mots trop clairs, laissant perdre des intuitions vagues mais riches. Mots confus, embrouillant et dissipant ce que nous avions pensé. Si notre attention se relâche, les mots en profitent

toujours de la même façon : ils provoquent des malentendus. Peu leur importe que s'ensuivent inimitiés graves ou quiproquos amusants. Les mots sont lourds !

Parfois, les mots d'un texte se font trop présents. Ils l'envahissent, comme une personne insistante nous envahit. Ils débordent l'auteur, et le mènent là où il ne voulait pas aller, comme la pesanteur mène au sol celui qui n'avait pas l'intention d'y aller. L'auteur n'a su écrire que des mots, et son texte est lourd. ■

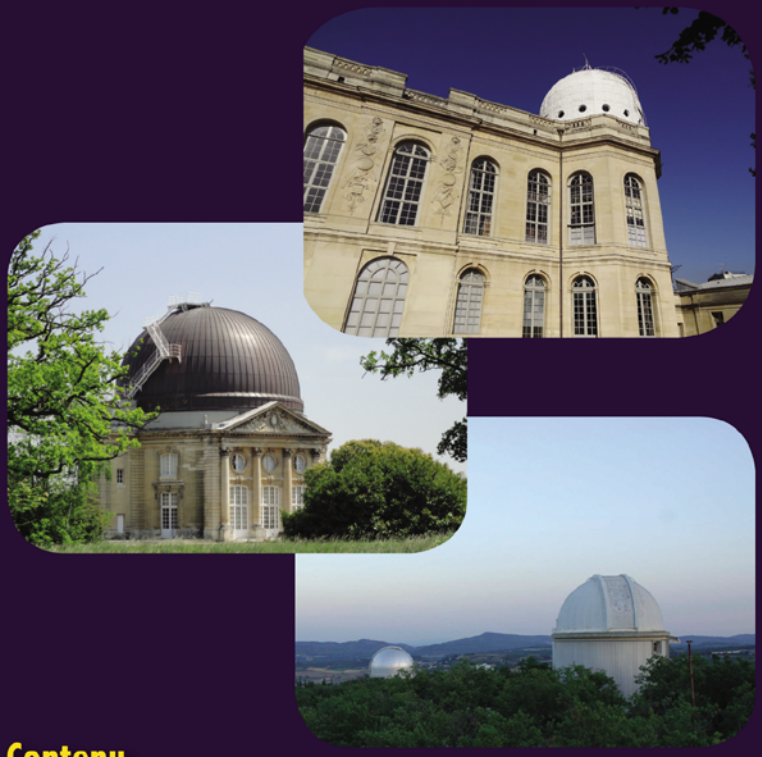
Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Septembre 2015 – N° d'édition M0770455-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/199 921 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

Observatoire de Paris

Diplôme d'Université

en présentiel et à distance

"Explorer et comprendre l'Univers"



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.
Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.
Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.
Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon.
Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence.
Les sujets abordés sont les suivants :

- Mécanique céleste et astrométrie
- Histoire de l'astronomie
- Ondes et instruments
- Le soleil
- Planétologie comparée
- Traitement de données
- Etoiles et milieu interstellaire
- Galaxies
- Cosmologie
- Observations

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 15 septembre sur le site d'inscription en ligne :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

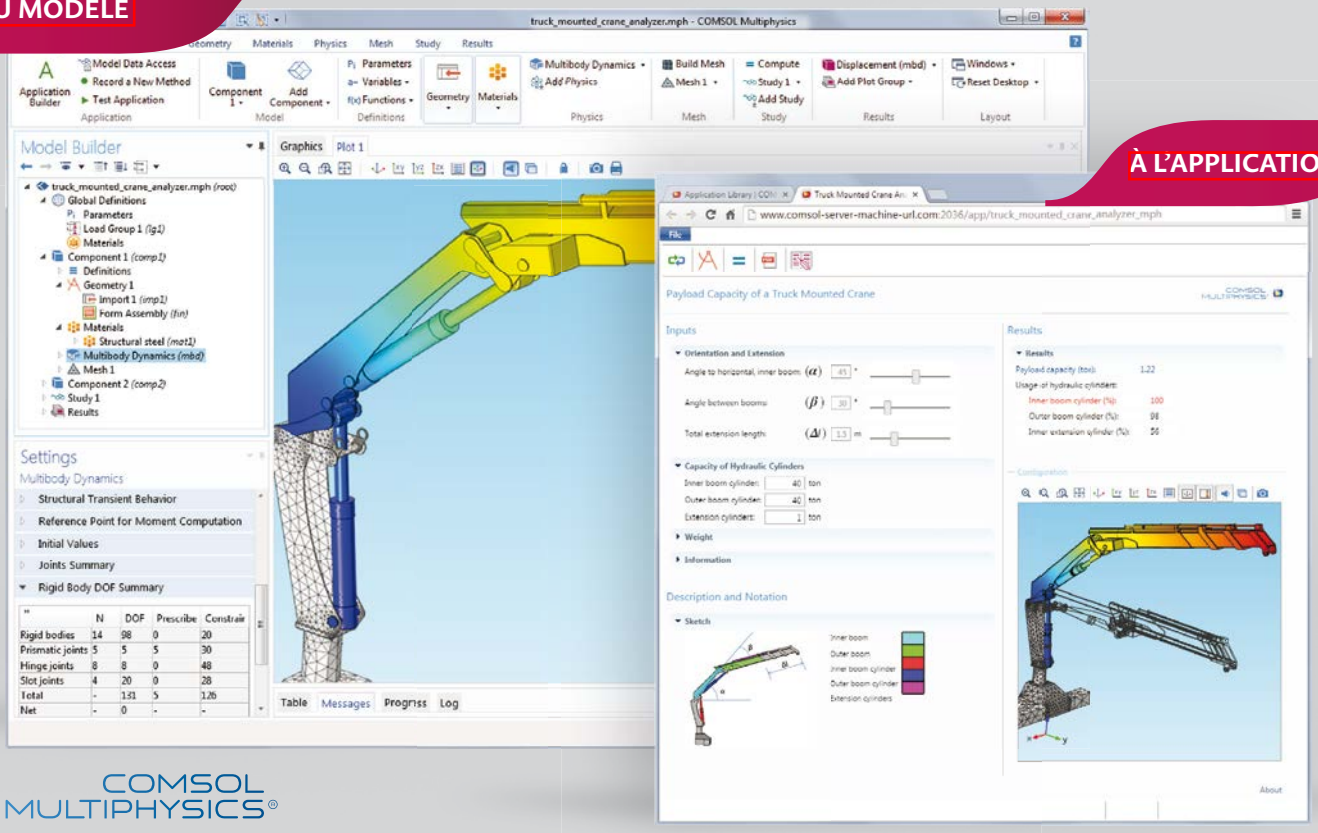
http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers-

contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87

l'Observatoire de Paris — UFE
Unité de Formation et d'Enseignement
Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen 92 195 Meudon

DU MODÈLE

À L'APPLICATION



COMSOL MULTIPHYSICS®

COMSOL SERVER™

Comment créer le meilleur design et partager votre expertise en simulation ?

GRÂCE À DE PUISSANTS OUTILS DE CALCULS.
AVEC DES APPLICATIONS FACILEMENT PARTAGEABLES.

comsol.fr/5.1

PRODUCT SUITE

- COMSOL Multiphysics®
- COMSOL Server™

ELECTRICAL

- AC/DC Module
- RF Module
- Wave Optics Module
- Ray Optics Module
- MEMS Module
- Plasma Module
- Semiconductor Module

MECHANICAL

- Heat Transfer Module
- Structural Mechanics Module
- Nonlinear Structural Materials Module
- Geomechanics Module
- Fatigue Module
- Multibody Dynamics Module
- Acoustics Module

FLUID

- CFD Module
- Mixer Module
- Microfluidics Module
- Subsurface Flow Module
- Pipe Flow Module
- Molecular Flow Module

CHEMICAL

- Chemical Reaction Engineering Module
- Batteries & Fuel Cells Module
- Electrodeposition Module
- Corrosion Module
- Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

- Optimization Module
- Material Library
- Particle Tracing Module

INTERFACING

- LiveLink™ *for* MATLAB®
- LiveLink™ *for* Excel®
- CAD Import Module
- Design Module
- ECAD Import Module
- LiveLink™ *for* SOLIDWORKS®
- LiveLink™ *for* Inventor®
- LiveLink™ *for* AutoCAD®
- LiveLink™ *for* Revit®
- LiveLink™ *for* PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ *for* PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ *for* Solid Edge®
- File Import *for* CATIA® V5

© Copyright 2015 COMSOL. COMSOL, 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