MATHÉMATIQUES
Paver un rectangle avec des tatamis

MÉDECINE
Les mécanismes de la douleur chronique

ART ET SCIENCE
Secrets d'Amazonie : les plumes tapirées

POUR LA SCIENCE

Février 2016 - n° 460

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'astronomie des neutrinos

Les premiers résultats

Belgique : 7,20 € - Canada : 10,95 CAD - Guadeloupe/St Martin : 7,30 € - Guyane : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique : 7,30 € - TOM : 980 XPF - Port. cont. : 7,20 € - Réunion : 9,30 € - Suisse : 12 CHF - Tunisie : 8,40 DT

M 02687 - 460 - F: 6,50 € - RD

À la CASDEN, le collectif est notre moteur !

Banque coopérative créée par des enseignants, la CASDEN repose sur un système alternatif et solidaire : la mise en commun de l'épargne de tous pour financer les projets de chacun.

Comme plus d'un million de Sociétaires, faites confiance à la CASDEN

Découvrez la CASDEN sur www.casden.fr ou contactez un conseiller au 01 64 80 64 80*

*Accueil téléphonique ouvert du lundi au vendredi de 8h30 à 18h30 (heure de Paris). Appel non surtaxé. Coût selon votre opérateur.

+X BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible dans les Délégations Départementales CASDEN et les agences Banques Populaires

casden BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

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
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Joubl
Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillet
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 :
Olivier Arnaez, Guillaume Chalons, Robert Halleux, Mathilde Jauzac, Évelyne Host-Platret, Anne-Lise Lamy, Lucille Le Corre, Jean-Jacques Perrier, Christophe Pichon, Loban Richard

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

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

COMMANDES 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

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

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

La lumière des neutrinos

Notre connaissance du monde repose presque exclusivement sur un seul type de messagers : les photons. Ce sont ces particules de lumière qui, *via* nos yeux et nos instruments, nous renseignent *in fine* sur la forme des objets, leur nature, leurs mouvements, les subtils mécanismes à l'œuvre au sein de la matière, les particules élémentaires, etc.

En astronomie, le rôle exclusif de la lumière est plus flagrant encore. Les astres se révèlent à nous par les photons qu'ils émettent ou qu'ils renvoient. Aussi la science du XX^{e} siècle s'est-elle évertuée à exploiter tout le spectre lumineux, des ondes radio aux rayons gamma, en passant par l'infrarouge, le domaine visible, les ultraviolets et les rayons X. Grâce à quoi notre connaissance de l'Univers a fait des bonds de géant.

Les premières informations de nouveaux messagers cosmiques

Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'un nouvel élan de l'astronomie grâce à un autre type de messagers : les neutrinos. Ces particules sont, comme les photons de la lumière, émises en très grand nombre par les étoiles et promettent de livrer de précieux renseignements sur leurs sources, en particulier les supernovæ et les trous noirs.

Mais les neutrinos n'interagissent presque pas avec la matière et sont, de ce fait, très difficiles à détecter. Des « observatoires » à neutrinos n'ont donc été mis au point que récemment. Il en est ainsi d'*IceCube*, installé dans les profondeurs glacées de l'Antarctique, et d'*Antares*, dans la mer Méditerranée. Or ces énormes détecteurs ont enregistré leurs premiers neutrinos cosmiques *(voir pages 24 à 31)*. Ils inaugurent ainsi l'astronomie à neutrinos – des particules qui, par ailleurs, restent un peu mystérieuses… pour le plus grand plaisir des physiciens *(voir pages 32 et 33)* ! ■

sommaire

3 Edito

Actualités

5 Stonehenge : des monolithes d'origine galloise

7 Une mémoire de l'obésité dans le sperme

8 Quand l'actine se prend pour une star

9 Une nouvelle particule détectée au LHC ?

11 Des sels qui font briller Cérès

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

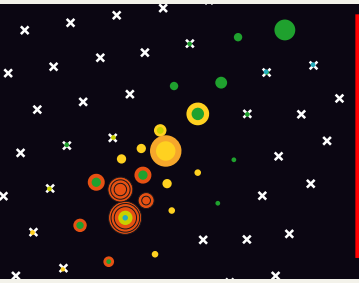
12 Point de vue
Espace : la loi du plus fort sera toujours la meilleure
Philippe Achilleas

14 Entretien
Maladie de Lyme : « Les outils pour améliorer le diagnostic sont pourtant là »
Muriel Vayssier-Taussat

19 Homo sapiens informaticus
Manifester sans lever le petit doigt
Gilles Dowek

20 Cabinet de curiosités sociologiques
Tu ne spoileras point !
Gérald Bronner

22 Lu sur SciLogs.fr
« C'est mon dernier mot, Jean-Pierre : le Soleil »
Richard Taillet



En couverture

La couverture de ce numéro s'inspire de certaines figures obtenues par les physiciens de l'expérience *IceCube*. Les ronds représentent *(en vue du dessus)* l'énergie déposée dans les capteurs lors de la détection d'un neutrino de haute énergie.

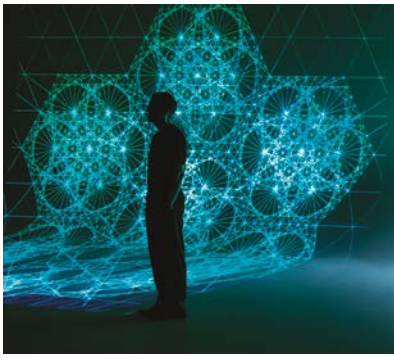
© Pour la Science

À LA UNE

24 ASTROPHYSIQUE
Les neutrinos du bout du monde
Francis Halzen
Télescope d'un nouveau type en opération au pôle Sud, *IceCube* enregistre des neutrinos de très haute énergie provenant des confins de l'Univers. Et qui aideront à résoudre certaines énigmes cosmiques.

32 PHYSIQUE
« La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence »
Entretien avec Marco Zito
Découverts à partir de 1956, les neutrinos sont des particules fortement intrigantes, dont les physiciens cherchent à mesurer les propriétés. De ces dernières dépendrait l'évolution de l'Univers.

34 NEUROSCIENCES
Du génie par accident
Darold Treffert
Il arrive qu'un traumatisme crânien, un accident vasculaire cérébral ou une maladie neurodégénérative fasse surgir un étonnant don artistique ou intellectuel. Le génie serait-il à la portée de chacun ?



40 ART ET SCIENCE
Le tapirage : l'art de personnaliser son oiseau
Serge Berthier
Plumez un perroquet vert vivant, enduisez-le d'une substance particulière... Après la repousse, vous obtenez un oiseau au plumage jaune-rouge. Telle est la recette du tapirage, une pratique amazonienne qui risque de disparaître – avec ses secrets.

48 TECHNOLOGIE
Capter les mouvements invisibles
Frédo Durand, William Freeman et Michael Rubinstein
En amplifiant d'imperceptibles variations de couleurs d'une image à l'autre d'une séquence vidéo, on détecte des mouvements infimes. Avec des applications aussi bien en médecine qu'en ingénierie.

54 MÉDECINE
Combattre la douleur chronique
Stephani Sutherland
Brûlures, élancements, douleurs sourdes... Quelle que soit sa forme, la douleur chronique défie les traitements. Mais de nouvelles découvertes sur ses causes ouvrent des pistes inédites pour enfin la juguler.

64 ÉCOLOGIE
Les étonnants prédateurs marins du gouf de Capbreton
Alexandre Dewez
Aussi grand que celui du Colorado, le canyon sous-marin de Capbreton, dans les Landes, est un extraordinaire milieu de vie. Il abrite de grands animaux marins qui, parfois, viennent s'échouer sur les côtes.

72 HISTOIRE DES SCIENCES
L'histoire discrète de l'encre invisible
Kristie Macrakis
Souvent associée à l'espionnage international, l'encre sympathique a aussi eu un âge d'or oublié en tant que magie de scène et démonstration de science.

Rendez-vous

78 Logique & calcul
Paver avec des tatamis
Jean-Paul Delahaye
Les tapis japonais ont des proportions bien définies. De combien de façons peuvent-ils recouvrir une pièce rectangulaire ?

84 Science & fiction
Hulk et la grenouille, champions de la métamorphose
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science
La glace brûle dans le triangle des Bermudes
Loïc Mangin

89 Idées de physique
Comment gagner une course de bobsleigh
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts
Les variations de l'activité du Soleil influent-elles sur le climat ?
Thierry Dudok de Wit

94 Science & gastronomie
Mettez un électrofileur dans votre cuisine
Hervé This

96 À lire

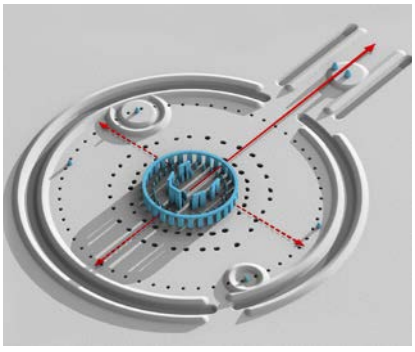
98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE .fr LETTRE D'INFORMATION
Ne manquez pas la parution de votre magazine grâce à la NEWSLETTER
Notre sélection d'articles
Des offres préférentielles
Nos autres magazines en kiosque
Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

EXCLUSIF

Stonehenge : des monolithes d'origine galloise

La carrière dont proviennent certains des plus anciens mégalithes de Stonehenge vient d'être découverte au pays de Galles, à 240 kilomètres de distance !



Le Stonehenge actuel *(ci-dessus)* est constitué de deux cercles de pierres. Ce sont les mégalithes du cercle intérieur *(en haut à droite)* qui proviennent d'affleurements rocheux gallois *(ci-contre à droite)*.

Des générations d'archéologues ont travaillé dur pour révéler l'histoire complexe de Stonehenge, ce célèbre site mégalithique proche de Salisbury, en Angleterre. Dernière avancée en date : Mike Parker Pearson, de l'université de Londres, et son équipe ont identifié l'affleurement rocheux dont proviennent certains des plus anciens mégalithes de Stonehenge.

Selon l'interprétation la plus courante, Stonehenge serait un sanctuaire doublé d'un observatoire. Fréquenté entre 2800 et 1100 avant notre ère, ce monument complexe a été refait plusieurs fois. Ainsi, à la fin du Néolithique, vers –2600, l'enceinte ronde délimitée par un fossé, un talus et peut-être une palissade, qui avait formé le tout premier sanctuaire, a été complétée par le « Stonehenge de pierre bleue », un cercle de mégalithes en dolérite (une roche magmatique) ou en rhyolithe (une roche volcanique). Plus tard, à l'âge du Bronze (–2500 à –800), ce premier cercle de pierres dressées sera démantelé et ses mégalithes employés pour constituer le cercle intérieur de Stonehenge *(voir le schéma en haut à droite)*.

On sait depuis les années 1920 que la « pierre bleue » provient des collines de Preseli, au pays de Galles. En 2014, les affleurements à l'origine de la dolérite y ont été identifiés. Restait à trouver ceux qui ont livré la rhyolithe. L'équipe de Mike Parker Pearson a identifié la provenance de la « rhyolithe à motifs de tissu » *(rhyolite with fabric)*, roche présentant une structure caractéristique à l'échelle du millimètre et qui forme de loin la plus grande part de la rhyolithe de Stonehenge.

Pour ce faire, les chercheurs ont rassemblé environ 1 200 éclats de rhyolithe à motifs de tissu provenant de multiples endroits à Stonehenge. Parmi eux figurent des fosses creusées au Néolithique, de sorte que l'on est certain que de la pierre bleue rhyolithique est arrivée à Stonehenge avant l'âge du Bronze. Après avoir étudié de près les caractéristiques des « motifs de tissu » de cette rhyolithe, les chercheurs sont partis à sa recherche dans le massif de Preseli. Ils ont repéré à Craig Rhos-y-felin un affleurement dont les roches avaient tous les traits recherchés.

La fouille des sols entourant l'affleurement a confirmé qu'il a servi de carrière au Néolithique et à l'âge du Bronze. Outre les éclats de pierre laissés par les carriers, les chercheurs ont trouvé de nombreux restes de foyers. Six mégalithes imparfaits ont aussi été abandonnés sur place, notamment un de quatre mètres de long dont la base s'était partiellement brisée au moment de son extraction *(ci-dessus, point rouge)*.

En fouillant le remblai le soutenant, les archéologues ont découvert deux fragments de bois carbonisés, qui dataient de 2 000 ans avant notre ère. Toutefois, des traces d'activités humaines de toutes époques parsèment le site ; c'est pourquoi, dans l'ensemble, on ne peut les

dater plus précisément qu'entre –4000 et –2000.

Pour Mike Parker Pearson, le plus vraisemblable est que les mégalithes sont parvenus à Stonehenge, à 240 kilomètres de Craig Rhos-y-felin, par la voie terrestre. Selon lui, les mégalithes pouvaient être déplacés après avoir été posés sur une sorte de litière rectangulaire conçue pour être soulevée à l'aide de nombreuses perches. Les membres d'une équipe de soixante personnes portant de cette façon un mégalithe de quelque 2 tonnes n'auraient à supporter que 30 à 50 kilogrammes à chaque instant. Cette façon de s'y prendre épargnait au monolithe les chocs et les frottements qui auraient pu l'abîmer, tandis qu'elle transformait en événement social spectaculaire le transport d'une pierre sacrée à travers le territoire de chaque communauté paysanne.

Ainsi, on peut imaginer que le lent transport vers Stonehenge de lourdes pierres a constitué une tradition séculaire. Chaque pierre sacrée aurait été transférée d'une communauté paysanne à l'autre, au cours de l'été vraisemblablement, et ce pendant assez de générations pour couvrir les 240 kilomètres de distance… Cette activité aurait été d'autant plus normale que les mêmes communautés paysannes se sont aussi beaucoup activées pour construire à leurs grands hommes des centaines de longs tumuli, dont la façade était parfois incrustée de pierres bleues.

On peut aussi imaginer que, au cours des siècles, plusieurs sanctuaires ont été déplacés pour être fusionnés dans le supersanctuaire de Stonehenge. Un « pré-Stonehenge » a-t-il existé au pays de Galles ?

François Savatie

Antiquity, vol. 89, pp. 1131-1352, 201

Biologie

Une mémoire de l'obésité dans le sperme

Si les enfants de pères obèses ont un risque plus élevé d'être obèses, c'est peut-être parce que les spermatozoïdes des pères gardent une mémoire de leur obésité. Une équipe dirigée par Romain Barrès, de l'université de Copenhague, au Danemark, vient en effet de montrer que l'obésité marque de façon particulière le génome des spermatozoïdes, et que la chirurgie bariatrique remodèle ces caractéristiques, notamment dans des régions du génome impliquées dans le contrôle de l'appétit. Le point avec Romain Barrès.

Comment vous est venue l'idée d'étudier la transmission de caractères aux spermatozoïdes ?

Romain Barrès : Diverses études chez des rongeurs ont montré que des facteurs nutritionnels peuvent changer le phénotype de la génération suivante et que les modifications introduites étaient d'ordre épigénétique : elles concernaient des caractéristiques du génome qui ne sont pas codées dans la séquence d'ADN. La transmission se faisant vraisemblablement par les cellules sexuelles, nous avons voulu savoir si les spermatozoïdes humains, eux aussi, étaient sensibles à leur environnement.

Comment avez-vous testé l'hypothèse ?

R. B. : Nous avons comparé l'épigénome (les modifications épigénétiques) des spermatozoïdes d'hommes obèses à celui d'hommes minces. Il y avait des différences. Notamment, les profils de méthylation de l'ADN (des modifications chimiques qui régulent sa lecture) variaient beaucoup entre personnes obèses et minces, et les différences portaient principalement sur des gènes importants pour le contrôle du développement du cerveau, et des gènes intervenant dans l'appétit et la régulation de la prise alimentaire.

L'obésité aurait-elle un effet épigénétique sur d'autres fonctions cérébrales que la régulation de l'appétit ?

R. B. : C'est vraisemblable, mais cela reste spéculatif. Nous avons comparé ses marques à une autre étude sur les spermatozoïdes d'hommes ayant eu un enfant autiste. Ces pères ont un plus grand risque d'avoir d'autres enfants autistes.

Romain Barrès, université de Copenhague

Nous avons comparé les méthylations sur les spermatozoïdes de ces hommes à nos résultats : de l'ordre de 80 % des gènes marqués étaient en commun. Or on sait que les hommes obèses risquent davantage d'avoir des enfants autistes. Ainsi, un lien s'établissait entre obésité et troubles du comportement, potentiellement transmis par des facteurs épigénétiques dans les spermatozoïdes.

La différence est-elle due à l'obésité ou au mode de vie ?

R. B. : Aucun lien n'est apparu entre marques épigénétiques et variables cliniques.

On ne sait donc pas si la différence est due à l'excès de calories, au manque d'activité physique ou à un type d'alimentation… Mais la chirurgie bariatrique a fourni une piste. Nous avons étudié le profil de méthylation de l'ADN de spermatozoïdes de six hommes obèses avant et après une telle opération visant à restreindre leur prise alimentaire. On observe un remodelage épigénétique, notamment sur des gènes impliqués dans le contrôle de l'appétit. Plusieurs causes sont possibles, mais nous pensons que la perte de poids a été déterminante.

Les modifications se transmettent-elles à la descendance ?

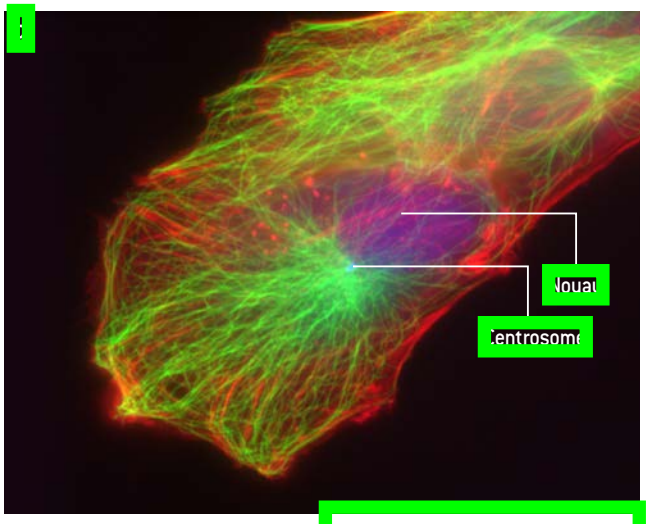
R. B. : Nous travaillons avec une clinique danoise de procréation médicalement assistée pour le déterminer. Nous avons accès à des spermatozoïdes des donneurs, aux cellules du cordon ombilical de leurs enfants et aux embryons non utilisés des mêmes donneurs (au Danemark, après cinq ans, les embryons ne sont plus utilisables pour la procréation et sont disponibles pour la recherche). Il nous faudra sans doute plusieurs années pour apporter une réponse.

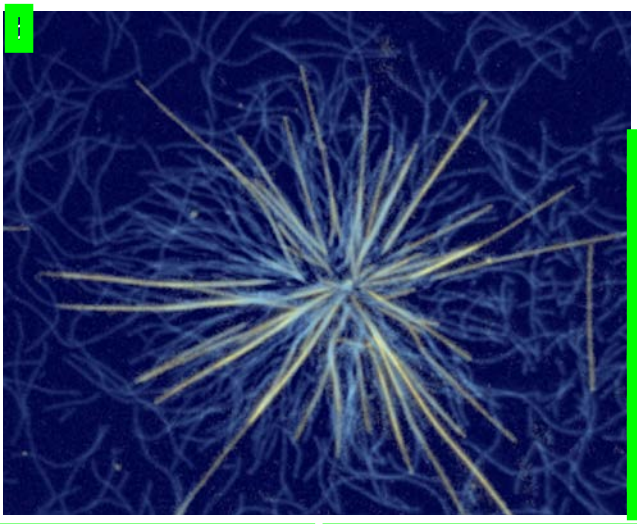
Marie-Neige Cordonnier

. Donkin et al., Cell Metabolism, vol. 23, pp. 1-10, 2016

Quand l'actine se prend pour une star

L'actine, un composant du squelette des cellules, est connue pour façonner leur forme. Mais elle assurerait aussi d'autres fonctions, notamment en se structurant en étoile.





Dans la cellule, on pensait que le centrosome *(a)*, près du noyau, n'assemblait que les microtubules *(en vert)*, tandis que les filaments d'actine *(en rouge)* tapissaient la paroi cellulaire. En fait, il est aussi capable de polymériser *in vitro* des filaments d'actine *(b, en bleu)*, avec des microtubules *(b, en jaune)* ou non.

94 %

de la séquence

protéique de l'actine de la levure est similaire à celle de la forme humaine. L'actine était donc déjà chez leur ancêtre commun… *

L'actine n'est pas seulement là où on l'attend. Cette protéine polymérise en courts filaments qui tapissent la paroi intérieure des cellules et qui sont l'un des principaux constituants du squelette de la cellule avec les microtubules, de longs filaments qui irradient de son centre. Depuis longtemps, on distingue les rôles de ces deux éléments. L'actine agit sur la forme des cellules comme une sorte de muscle, tandis que les microtubules servent de moyen de communication entre le centre et la périphérie des cellules, et interviennent dans le déplacement des chromosomes lors de la division cellulaire – la mitose. Toutefois, deux études récentes montrent que les choses ne sont pas si simples.

D'une part, l'actine peut, comme les microtubules, former une étoile au centre de la cellule. C'est ce qu'a observé l'équipe du CytomorphoLab (cytomorpholab.com), à Grenoble et Paris, sous la direction de Manuel Théry. D'autre part, l'équipe de Marie-Hélène Verlhac, du Centre interdisciplinaire de recherche en biologie (Inserm/CNRS/Collège de France), à Paris, a mis en évidence le rôle clé de l'actine dans la première mitose – la division de l'embryon au stade d'une cellule, le zygote.

L'étoile de microtubules est assemblée par un organite, le centrosome. Diverses études ont suggéré qu'il interagit avec l'actine. De l'actine a été détectée non loin, et un réseau dynamique de ses filaments est impliqué dans la formation et l'orientation du fuseau de microtubules qui orchestre la mitose, le fuseau mitotique, dont les extrémités sont les centrosomes des deux futures cellules filles. Toutefois, on pensait que l'interaction centrosome-actine se faisait *via* des microtubules.

En extrayant le centrosome et en le mettant en présence de monomères d'actine dans une solution imitant le milieu intracellulaire, Manuel Théry et ses collègues ont montré qu'il peut induire la croissance de filaments sans l'aide de microtubules. Et dans les cellules, ils ont parfois détecté un nuage similaire autour du centrosome. À quoi sert ce nuage ? La question reste ouverte, mais il n'apparaît que dans les cellules les moins adhérentes. Une façon d'indiquer au centre de la cellule quand celle-ci se décolle de son substrat, par exemple lors de la mitose ?

L'autre équipe a voulu comprendre par quel mécanisme la mitose du zygote est symétrique, alors que celle d'un ovule, pourtant de même taille et de même forme, ne l'est pas. Les ovules n'ont pas de centrosome ; les microtubules s'y autoorganisent pour former un fuseau, mais celui-ci s'ancre dans le réseau d'actine de la plus proche paroi. L'actine régule alors le positionnement fin du fuseau, mais la division reste asymétrique à cause de l'ancrage excentré. Que se passe-t-il dans le zygote, lui aussi dépourvu de centrosome ?

En perturbant la polymérisation de l'actine ou des microtubules au fil de la mitose, les biologistes, avec l'aide de biophysiciens, ont montré que l'actine régule aussi son centrage, mais d'une autre façon. La division débute avec la formation de deux structures identiques contenant le même matériel génétique – des pronoyaux. Un réseau d'actine les déplace peu à peu vers le centre de la cellule. Puis leur membrane se rompt et le fuseau se forme. L'actine sous la paroi du zygote procède alors à son centrage fin en se tendant fortement – alors que dans l'ovule, la tension se relâche… L'actine est décidément bien plus qu'un simple « muscle » cellulaire.

M.-N. C.

F. Farina et al., Nature Cell Biology, 14 décembre 2016 ; A. Chaigne et al., Nature Communications, 4 janvier 2016

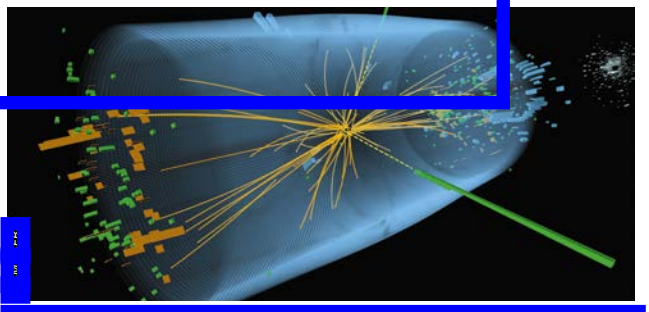
Actualités

Physique des particules

Une nouvelle particule détectée au LHC ?

Après deux ans de travaux consacrés à l'augmentation de sa puissance, le collisionneur LHC du Cern a redémarré en juin 2015 avec des collisions de protons à une énergie de 13 téraélectronvolts. Récemment, la blogosphère et les réseaux sociaux bruissaient de rumeurs concernant un signal prometteur : un excès de paires de photons à une énergie proche de 750 gigaélectronvolts, signature possible d'une nouvelle particule.

Lors d'une conférence tenue le 15 décembre, les coordinateurs de la physique des deux complexes de détection CMS et ATLAS, Jim Olsen, de l'université de Princeton, et Marumi Kado, du Laboratoire de l'accélérateur linéaire de l'université Paris-Sud, ont confirmé l'observation d'un tel signal, indépendamment par les deux dispositifs. Ils soulignent cependant que la prudence est de mise, les détecteurs n'ayant pas encore accumulé assez de données pour que l'on puisse parler d'une découverte.



Simulation d'un signal à deux photons *(les longs traits verts)* dans le détecteur CMS.

La mise en évidence du boson de Higgs en 2012 avait une nouvelle fois confirmé le modèle standard de la physique des particules, mais ce modèle, soupçonne-t-on, serait la version effective à relativement basse énergie d'une théorie plus fondamentale. Le signal à 750 gigaélectronvolts pourrait relever d'une telle théorie et être dû à la désintégration d'une particule inédite.

Cependant, ce signal pourrait aussi n'être qu'une accumulation fortuite de données à cette énergie. Les collisions proton-proton reprendront en avril 2016. Les données supplémentaires accumulées en trois mois devraient alors suffire pour trancher la question.

De leur côté, les théoriciens essayent déjà d'imaginer quelle serait la nature de cette éventuelle particule qui se désintègre en deux photons. Peut-être un deuxième boson de Higgs que prévoient certaines théories ? Ou une particule liée à des modèles où l'espace est de dimension supérieure à trois ?

Jean Baillu

Migrateurs mal protégés

Les populations d'un grand nombre d'espèces d'oiseaux migrateurs ont décliné ces trente dernières années, malgré les efforts de protection. Claire Runge, de l'université du Queensland en Australie, a étudié avec plusieurs collègues américains, anglais et australiens dans quelle mesure les oiseaux sont protégés ou non tout au long de leurs routes migratoires. Ces chercheurs montrent notamment que seuls 9 % des 1 451 espèces migratrices bénéficient d'aires protégées couvrant toutes les étapes de leur cycle annuel. Deux espèces ne disposent même d'aucune zone protégée sur leur aire de répartition. Les oiseaux non migrateurs sont bien mieux lotis, avec 45 % d'espèces adéquatement protégées. Étant donné ce constat, Claire Runge et ses collègues appellent notamment à l'amélioration des mécanismes internationaux mis en place pour choisir de nouvelles aires de protection ou pour les étendre, et à renforcer considérablement la coordination entre les différents pays.

Neurophysiologie

Des bactéries intestinales coupe-faim

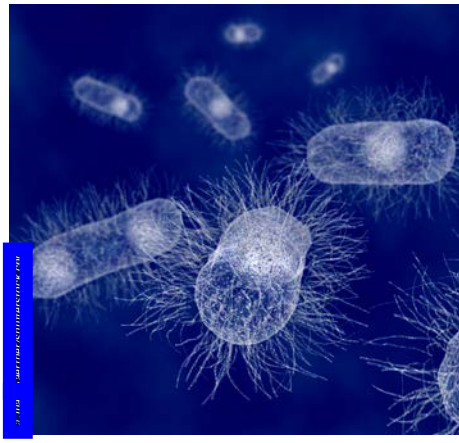
Avoir faim ou non, est-ce uniquement une question de communication entre notre cerveau et nos intestins ? Non. Les travaux de l'équipe de Sergueï Fetissov, à l'Inserm et à l'université de Rouen, confirment que notre flore intestinale, quelque 1,5 kilogramme de bactéries, joue aussi un rôle essentiel.

Ces chercheurs ont cultivé des colibacilles de la flore intestinale de rats (une bactérie banale dans la flore humaine). Vingt minutes après avoir commencé à recevoir des nutriments, ces bactéries se sont multipliées et ont produit des protéines différentes de celles qu'elles sécrétaient avant. Or vingt minutes, c'est aussi le délai requis pour qu'un humain ou un rat ressente une sensation de satiété lors d'un repas. En outre, des rats et des souris affamés auxquels les chercheurs ont injecté ces protéines de bactéries « rassasiées » ont moins mangé que d'habitude durant leur repas. À l'inverse, les protéines produites par des bactéries « affamées » favorisaient la prise alimentaire.

Restait à identifier les protéines impliquées. Davantage de protéine ClpB a été trouvée avec les bactéries « rassasiées ». Elle ressemble beaucoup à une hormone de la satiété et stimulerait chez le rongeur la production intestinale d'autres hormones favorisant la satiété, ainsi que la sécrétion d'insuline. Sergueï Fetissov et ses collègues ont montré qu'elle active directement les neurones anorexigènes de l'hypothalamus des rats et qu'elle circule dans le sang plusieurs heures après un repas. Elle a donc probablement un effet à plus long terme sur la satiété. C'est la première fois que l'on identifie une protéine de la flore intestinale qui intervient sur notre équilibre alimentaire en modulant directement l'activité du centre cérébral de la faim.

Bénédicte Salthun-Lassalle

J. Breton et al., Cell Metabolism, en ligne le 24 novembre 2015



Par les protéines qu'elles produisent, les bactéries de nos intestins agiraient sur l'activité du centre de contrôle cérébral du comportement alimentaire.

Actualités

Les sites actifs des enzymes

Simon Aubailly et Francesco Piazza, du Centre de biophysique moléculaire du CNRS à Orléans, ont développé un code de calcul pour prédire la localisation du ou des sites actifs au sein d'une enzyme, un enjeu important en recherche biomédicale. Leur méthode, testée sur une base de données de 835 enzymes dont les sites catalytiques sont connus, a permis de retrouver au moins un site dans plus de 50 % de ces molécules, et cela à un acide aminé près dans 70 % des cas.

La blague idéale

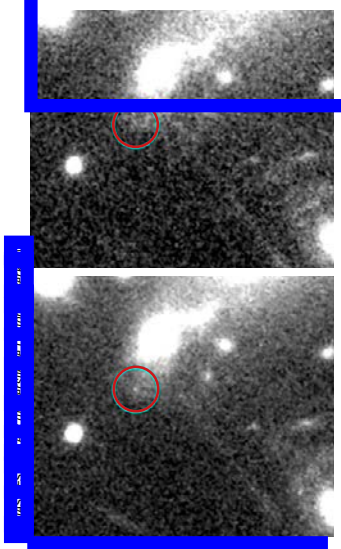
Plus une blague est complexe, plus elle offre de possibilités pour surprendre, et donc faire rire. Encore faut-il ne pas égarer son auditeur ! Robin Dunbar et ses collègues de l'université d'Oxford ont ainsi montré que les plaisanteries sont, en moyenne, jugées de moins en moins drôles quand le nombre de personnages augmente – l'idéal étant deux. En effet, nous peinons à suivre les histoires d'un « degré d'intentionnalité » trop élevé, c'est-à-dire comportant trop d'états mentaux imbriqués (« il pense qu'elle croit que son mari s'imagine que… »).

Dispersion par dérive

Lorsque des particules sont injectées dans un fluide (un polluant dans de l'air par exemple), elles se dispersent par deux effets : l'agitation thermique à l'échelle moléculaire, et les mouvements dont est animé le fluide. Thomas Guérin et David Dean, du Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (CNRS/université de Bordeaux), viennent de montrer que dans un milieu hétérogène (un fluide dans un solide poreux par exemple), un troisième effet de dispersion intervient si les particules sont soumises à une force extérieure : cette force les fait dériver dans une direction donnée, et cette dérive a pour conséquence de modifier la dispersion à la fois dans la direction de la dérive et dans la direction perpendiculaire.

Astrophysique

Une supernova aux airs de déjà vu



Deux images de *Hubble* montrant l'apparition de la supernova Refsdal, prises le 30 octobre *(en haut)* et le 11 décembre 2015

En novembre 2014, le télescope spatial *Hubble* a observé une supernova exceptionnelle nommée Refsdal, distante de plus de 9 milliards d'années-lumière. Du fait de la présence d'un amas de galaxies entre l'étoile qui a explosé et nous, la lumière de l'explosion a suivi plusieurs chemins dans l'espace avant de parvenir à *Hubble*. L'instrument a alors enregistré dans son champ de vision quatre images de la supernova, une première ! Encore plus extraordinaire : la même supernova est réapparue en décembre 2015 ! Comment est-ce possible ?

Selon les lois de la relativité générale, l'amas de galaxies déforme l'espace-temps, ce qui crée des images multiples de la supernova située en arrière-plan. De plus, comme la répartition de matière dans l'amas n'est pas homogène, les trajets empruntés par la lumière de l'explosion ne sont pas identiques, ce qui entraîne une différence sur les temps d'arrivée des rayons lumineux.

Plusieurs équipes d'astrophysiciens ont alors calculé que la supernova aurait pu être observée à un certain moment entre 1994 et 2004, et qu'elle le serait à nouveau entre fin 2015 et début 2016. Par exemple, l'équipe de Mathilde Jauzac, de l'université de Durham, prévoyait une apparition entre novembre 2015 et janvier 2016. Or la supernova est apparue le 11 décembre. Un grand succès pour ces astrophysiciens !

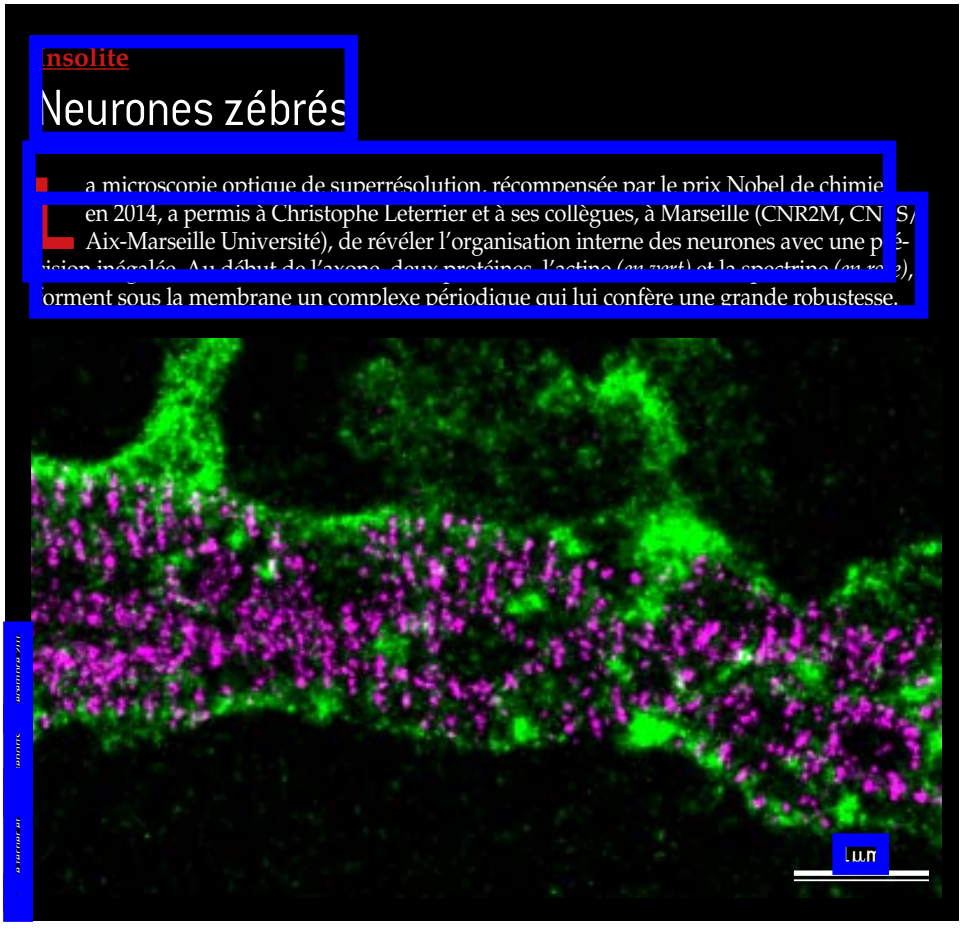
S. B

http://arxiv.org/abs/1509.08911

Insolite

Neurones zébrés

La microscopie optique de superrésolution, récompensée par le prix Nobel de chimie en 2014, a permis à Christophe Leterrier et à ses collègues, à Marseille (CNRS/Aix-Marseille Université), de révéler l'organisation interne des neurones avec une précision inégalée. Au début de l'axone, deux protéines, l'actine *(en vert)* et la spectrine *(en rose)*, forment sous la membrane un complexe périodique qui lui confère une grande robustesse.



1 µm

Actualités

Neurosciences

Testostérone et orientation

Selon plusieurs études, mais pas toutes, les hommes sont plus performants que les femmes dans des tâches de navigation spatiale, comme parcourir le plus court chemin entre deux points dans un labyrinthe ou des exercices de rotation mentale d'un objet en trois dimensions. Et les hormones sexuelles, notamment la testostérone, seraient impliquées en modifiant l'activité de certaines régions cérébrales. Toutefois, on ignore le rôle exact de la testostérone. Carl Pintzka, de l'université norvégienne des sciences et des technologies (NTNU), et ses collègues ont voulu en avoir le cœur net.

Ils ont proposé à quarante-deux jeunes femmes de mémoriser un grand espace virtuel en trois dimensions avec des pièces, des couloirs et des *open spaces*, puis d'y effectuer diverses tâches de navigation pendant qu'ils enregistraient leur activité cérébrale par IRM. La moitié des femmes recevaient une dose de testostérone sous la langue, l'autre moitié un placebo. On évaluait ensuite leur connaissance de l'environnement, leurs stratégies de déplacement et leur capacité de rotation mentale.

Résultat : les femmes ayant reçu la testostérone se représentaient un peu mieux les trajets dans le bureau virtuel et étaient un peu meilleures dans les tâches de rotation mentale, comparé aux autres participantes. Mais elles ne se déplaçaient pas mieux dans l'environnement et n'avaient pas de meilleures stratégies de navigation ! Les chercheurs ont toutefois observé des différences d'activité cérébrale. Chez les femmes « testostéronées », le lobe temporal médian était davantage excité quand elles réussissaient un trajet dans le bureau virtuel, et plus cette région cérébrale était imprégnée de l'hormone, plus elle s'activait. Or cette aire est riche en récepteurs des hormones sexuelles et intervient dans les aptitudes à la navigation, du moins chez les hommes. En outre, les femmes ayant eu davantage de testostérone lors de leur développement fœtal (ce qui est mesuré par le rapport des longueurs de deux doigts) réussissaient légèrement mieux les exercices de rotation mentale et leur cortex parahippocampique s'activait plus.

La testostérone ne modifie donc pas beaucoup la cognition spatiale des femmes et n'a aucun effet sur leurs facultés de navigation. En revanche, elle augmenterait bien l'activité cérébrale de certaines aires impliquées dans le sens de l'orientation… des hommes.

B. S.-L.

C. W. S. Pintzka et al., Behavioural Brain Research, vol. 298 B, pp. 78-90, 2016

Planétologie

Des sels qui font briller Cérès

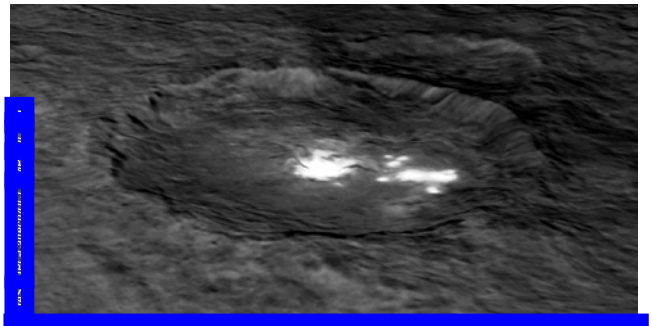
Lors de son approche de la planète naine Cérès qui avait débuté en janvier 2015, la sonde *Dawn* a révélé à la surface du corps des points brillants dont la nature échappait aux astrophysiciens. Andreas Nathues, de l'institut Max Planck à Göttingen, et ses collègues ont analysé les données et les images de la caméra *Framing Camera* de la sonde *Dawn*, en orbite autour de Cérès depuis le 6 mars 2015. D'après les résultats, les régions brillantes sont riches en sels, de sulfate de magnésium probablement.

La sonde *Dawn* a commencé son périple à travers le Système solaire en 2007. À son arrivée dans la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, elle a rendu visite à l'astéroïde Vesta de 2011 à 2012, puis s'est mise en orbite autour de Cérès, le plus gros corps (diamètre moyen d'environ 950 kilomètres) de la ceinture d'astéroïdes. Les photographies de la surface de la planète naine révèlent 130 zones brillantes, dont les plus lumineuses sont celles des cratères Occator (90 kilomètres de large) et Oxo (10 kilomètres de large). Les propriétés optiques de ces points et la détection de vapeur d'eau dans l'environnement de Cérès par le télescope spatial *Herschel* pointaient vers trois explications possibles quant à la nature de ces points lumineux : de la glace d'eau, des minéraux argileux ou des sels. L'analyse spectroscopique a tranché et indique la présence d'hexahydrite, des sels de sulfate de magnésium hydratés.

Dawn a par ailleurs observé la formation de brume dans Occator et Oxo, lorsque ces cratères sont éclairés par le Soleil. Il s'agit probablement de glace d'eau qui, en chauffant, se sublime et emporte des petits cristaux de glace et de la poussière, créant ainsi la brume.

Philippine Caré

A. Nathues et al., Nature, vol. 528, pp. 237-240, 2015



Les zones brillantes sur Cérès, ici dans le cratère Occator, devraient leur luminosité à des sels de sulfate de magnésium hydratés.

L'électron est-il éternel ?

Si la loi de la conservation de la charge électrique pouvait connaître des exceptions, ce qu'envisagent certaines théories encore très spéculatives, l'électron pourrait se désintégrer en un photon de 256 kiloélectronvolts et un neutrino. C'est un tel processus qu'a traqué le détecteur de neutrinos Borexino, en Italie. Sans succès, ce qui pose une borne supérieure sur la probabilité de la désintégration, et donc une limite inférieure à la durée de vie de l'électron : au moins $6,6 \times 10^{28}$ années !

De récents ancêtres africains

Helicobacter pylori, bactérie à l'origine d'ulcères, vit dans le milieu acide de l'estomac humain. Autour de Frank Maixner, de l'Institut pour les momies, à Bolzano, en Italie, une équipe a séquencé le génome des *H. pylori* de l'homme des glaces Ötzi, mort il y a plus de 5 000 ans. L'étude montre que la bactérie d'Ötzi est proche de l'*H. pylori* européenne actuelle, hybride de souches asiatiques et est-africaines anciennes, mais bien plus proche de la souche asiatique qu'elle ne l'est de la souche est-africaine. Cela suggère que la population européenne postérieure à Ötzi a reçu un important apport migratoire africain.

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

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Espace : la loi du plus fort sera toujours la meilleure

En adoptant une loi permettant à ses citoyens de posséder et d'exploiter des ressources spatiales, les États-Unis ouvrent grand à leur secteur privé les richesses des corps célestes. Quitte à violer le traité international qu'ils ont signé en 1967.

Philippe ACHILLEAS

Le 25 novembre 2015, le président des États-Unis, Barack Obama, a signé le *Space Resource Exploration and Utilization Act* (« Loi sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace »), soumis à la Chambre des représentants en mai 2015. Cette loi vise à encourager l'exploitation commerciale des ressources spatiales par des entreprises privées.

Il ne s'agit pas de la première initiative américaine destinée à associer la sphère privée à l'utilisation commerciale de l'espace. Les opérateurs américains ont déjà investi l'espace dans les domaines des télécommunications, de l'observation de la Terre et, plus récemment, dans celui du transport spatial et des vols suborbitaux. Cependant, avec le texte de 2015, les États-Unis s'attaquent à un tabou en remettant en cause l'un des piliers du droit international de l'espace.

La loi engage ainsi l'administration américaine à mettre en place un cadre réglementaire visant à conférer à toute personne de citoyenneté américaine le droit d'exploiter, à des fins commerciales, les ressources spatiales. Ainsi, sous réserve de l'obtention d'autorisation d'exploitation délivrée par le gouvernement fédéral, un citoyen américain engagé dans la récupération commerciale d'une ressource de l'espace détiendra tous les droits sur la ressource. Cela inclut le droit de la posséder, de la transporter, de l'utiliser et de la vendre.

Le texte vise expressément les ressources provenant des astéroïdes, mais aussi, plus généralement, les ressources spatiales. Celles-ci, toujours selon la loi adoptée, comprennent l'eau et les minéraux.

La loi ouvre ainsi la voie à l'exploitation privée des ressources spatiales. Ce feu vert était très attendu par certaines entreprises, notamment *Planetary Resources*, qui développe des techniques d'exploitation minière des astéroïdes. Il s'agit surtout pour le gouvernement américain de poursuivre son ambitieuse politique spatiale sur des fonds privés, alors que les budgets publics sont en baisse.

Contradiction flagrante avec le Traité de l'espace

Le *Space Resource Exploration and Utilization Act* de 2015 est en contradiction flagrante avec les traités internationaux. Il s'oppose directement au principe de non-appropriation de l'espace tel qu'il découle du Traité de l'espace du 27 janvier 1967 et de l'Accord régissant les activités des États sur la Lune et les autres corps célestes du 18 décembre 1979.

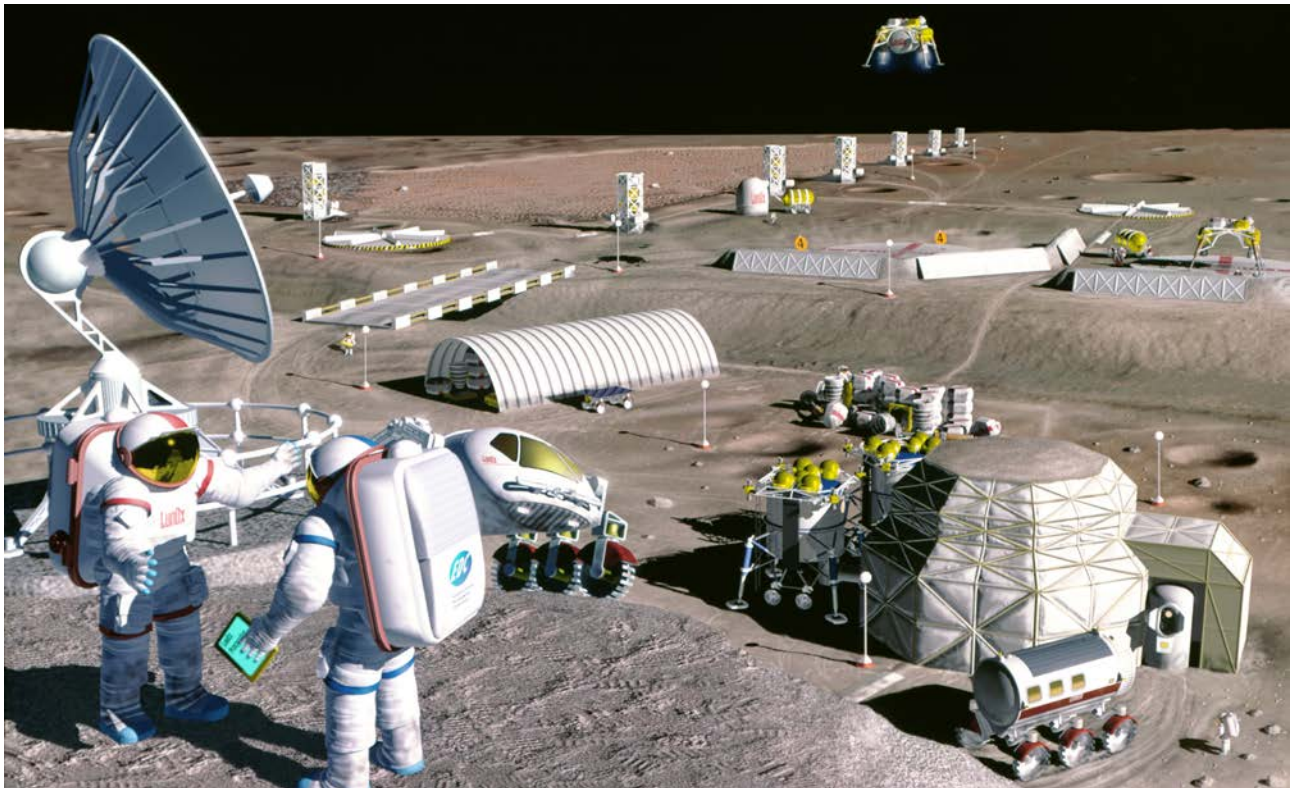
La non-appropriation de l'espace extra-atmosphérique représente l'un des principes fondamentaux du droit de l'espace. Il est énoncé à l'article II du Traité de l'espace de 1967. Selon cet article, « L'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation ou d'occupation, ni par aucun autre moyen. »

L'Accord sur la Lune va plus loin. Son article 11 précise que l'ensemble des corps célestes du Système solaire ainsi que leurs ressources font partie du patrimoine commun de l'humanité. En conséquence, l'exploitation des ressources naturelles des corps célestes doit être mise en œuvre dans le cadre d'un régime international que les États signataires de l'Accord sur la Lune se sont engagés à mettre en place.

Le principe de patrimoine commun de l'humanité s'est heurté à l'opposition des puissances spatiales, qui ont préféré ne pas s'engager sur le texte. On comprend alors que l'Accord sur la Lune n'ait été ratifié que par seize États, dont aucun acteur spatial majeur (États-Unis, Russie, Chine, Japon, Inde, France…) ne fait partie. Par ailleurs, à ce jour, ces États n'ont toujours pas élaboré le régime international relatif à l'exploitation des ressources naturelles prévu par le texte.

La plupart des pays, notamment les États-Unis, restent ainsi liés par le principe de non-appropriation tel que posé par le Traité de l'espace de 1967. Or ce traité, selon son interprétation historique, interdit toute forme de propriété dans l'espace. Les États-Unis, qui sont à l'origine de la règle, en sont parfaitement conscients.

Les États-Unis ne comptent ni dénoncer ni modifier expressément le Traité de l'espace. C'est d'abord sous l'angle de l'interprétation qu'ils entendent affirmer le caractère internationalement licite de leur loi. Un premier



élément d'interprétation consiste à considérer que le principe de non-appropriation ne s'applique pas à l'appropriation par les personnes privées. Un second consiste à distinguer l'appropriation des corps célestes, qui est interdite, de l'exploitation de leurs ressources naturelles, qui serait licite. D'ailleurs, la loi américaine prend le soin de préciser que le texte ne confère aucun droit de souveraineté, de juridiction ou de propriété sur les corps célestes.

Aucune de ces interprétations n'a été à ce jour validée par la communauté internationale. La réaction de cette dernière sera justement déterminante. Réunis au sein du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique de l'ONU, les États participant à l'aventure spatiale devraient se prononcer sur l'initiative américaine. Le débat est attendu pour le mois d'avril 2016.

Si les autres puissances spatiales, notamment la Russie, le Japon ou la France, restent neutres ou se contentent d'une protestation molle, les États-Unis auront alors réussi leur stratégie juridique. Mais même si la réaction est plus vive, les États-Unis pourront toujours bloquer l'adoption d'un texte faisant état d'une violation du droit international.

A l'évidence, les États-Unis sont en train de faire bouger les lignes comme en 1945, lorsque le président Truman avait unilatéralement étendu la juridiction américaine sur les ressources naturelles de leur plateau continental, situées à l'époque dans les eaux internationales. Cette pratique, reprise par d'autres États, a conduit à une révision du droit international de la mer dans le sens des intérêts économiques des États côtiers.

Dans le contexte actuel de la réduction des budgets publics, chacun sait que l'aventure spatiale ne pourra se poursuivre sans l'apport massif des investisseurs privés. Dès lors, l'idéalisme juridique des années 1960, qui entendait placer l'espace en dehors des intérêts commerciaux, ne devrait pas résister au réalisme. ■

L'EXPLOITATION MINIERE

des corps célestes tels que la Lune ou les astéroïdes est désormais possible pour les entreprises privées des États-Unis, en vertu de la nouvelle loi adoptée unilatéralement par ce pays.

L'AUTEUR

Philippe ACHILLEAS, professeur de droit public à l'université de Caen-Normandie, est directeur de l'IDEST (Institut du droit de l'espace et des télécommunications) à la faculté Jean Monnet, Sceaux (université Paris-Sud)

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Maladie de Lyme : « Les outils pour améliorer le diagnostic sont pourtant là »

La maladie de Lyme pose un problème de santé publique : sous-diagnostiquée, elle laisse de nombreuses personnes aux prises pendant des années avec des douleurs chroniques. Alors que les solutions sont à portée de main !

Muriel VAYSSIER-TAUSSAT, directrice de recherche à l'Inra, dirige l'équipe Vectotiq à l'École vétérinaire d'Alfort (Enva).

Transmise par les tiques, la borréliose de Lyme est une maladie plutôt bien connue, que l'on sait guérir à l'aide d'antibiotiques adaptés. Pour autant, son diagnostic pose de nombreuses difficultés. Selon une estimation de l'Institut de veille sanitaire, la France compte environ 27 000 nouveaux cas par an. Mais, selon les associations de malades, ce nombre est très sous-estimé, divers symptômes invalidants apparaissant parfois longtemps après un test de dépistage négatif. Pourquoi un tel écart ? Pourquoi est-il si compliqué de détecter la maladie de Lyme et quelles solutions sont envisagées pour améliorer le diagnostic ? Éclairage de Muriel Vayssier-Taussat, responsable de l'équipe Vectotiq (UMR BIPAR, Inra-Anses-Enva), à Maisons-Alfort.

POUR LA SCIENCE
Qu'est-ce que la borréliose de Lyme ?

MURIEL VAYSSIER-TAUSSAT : C'est une maladie causée par différentes espèces de bactéries du groupe *Borrelia burgdorferi* (ce groupe d'une vingtaine d'espèces du genre *Borrelia* a été rassemblé sous le nom de la première espèce identifiée comme responsable de la maladie). Aux États-Unis, une seule espèce est présente, *Borrelia burgdorferi* au sens strict. En France et en Europe, cinq espèces responsables de la borréliose circulent (*Borrelia burgdorferi, B. garinii, B. afzelii, B. valaisiana et B. spielmanii*). Ces bactéries sont transmises par des acariens, des tiques du genre *Ixodes*. Différentes espèces de tiques transmettent la maladie de Lyme selon les régions. En France, le vecteur est l'espèce *Ixodes ricinus* ; aux États-Unis, il s'agit d'une cousine proche et, dans le nord de l'Europe, une autre espèce encore sévit.

Les bactéries du groupe existent de manière naturelle chez les animaux sauvages, principalement chez des petits rongeurs et des oiseaux. Insensibles à ces bactéries, ces animaux en constituent des réservoirs sur lesquels la tique se contamine quand elle prend un repas sanguin. Lors d'un autre repas sanguin, elle transmet la bactérie à l'homme ou à d'autres animaux, en particulier domestiques, chez qui cette dernière peut aussi déclencher la maladie.

PLS
Quelle est l'incidence de la maladie ?

M. V.-T. : En France, l'incidence de la maladie est une estimation de l'Institut de veille sanitaire à partir du nombre de cas répertoriés par des médecins sentinelles entre 2009 et 2011. En moyenne, on a ainsi 43 nouveaux cas par an pour 100 000 habitants, avec des disparités selon les régions. Les régions les plus touchées sont très boisées, avec une forte présence d'animaux sauvages, telles que l'Alsace (+ plus de 100 nouveaux cas pour 100 000 habitants) et la Meuse. Aux États-Unis, les Centres de contrôle et de prévention des maladies (CDC) estiment selon une méthode similaire que 300 000 nouveaux cas sont diagnostiqués par an, principalement concentrés dans 14 États (en 2014, l'État le plus touché était le Maine, avec 88 nouveaux cas pour 100 000 habitants). En Europe, on compte environ 85 000 nouveaux cas par an. Des disparités existent selon les pays, mais la comparaison des données entre les pays est limitée par la diversité des sources et des périodes d'étude.

PLS
Quels sont les symptômes de la maladie ?

M. V.-T. : Plusieurs jours après la morsure d'une tique infectée apparaît sur la peau une tache rouge qui grossit, atteignant parfois plus de 5 centimètres de diamètre, puis disparaît en quelques jours. Cet érythème migrant est le symptôme classique de la maladie de Lyme. Si une personne s'est aperçue qu'elle a été mordue par une tique, remarque l'érythème et consulte un médecin, celui-ci lui prescrit un traitement antibiotique qui dure environ quinze jours et est très efficace à

cette phase précoce, et la personne guérit en trois semaines à un mois.

PLS

Que se passe-t-il si l'on ne remarque pas l'érythème migrant ?

M. V.-T. : C'est alors que les problèmes surviennent, ou lorsque l'on voit un érythème, mais que l'on ne consulte pas. Celui-ci s'estompant assez vite et n'étant pas accompagné d'autres signes cliniques, on le pense sans gravité. En général, on ne s'aperçoit même pas qu'on est mordu par une tique, car au moment où elle pique, elle injecte des substances anesthésiantes. On peut ainsi rester avec une tique pendant plusieurs jours sans le savoir. On la remarque parfois quand elle grossit, la tique devenant 50 fois plus grosse à l'issue d'un repas.

Or sans le traitement antibiotique précoce, la situation se complique. D'autres symptômes très variés – articulaires, musculaires, neurologiques – apparaissent plusieurs semaines après l'érythème migrant. Le traitement est alors plus compliqué, car les antibiotiques sont beaucoup moins efficaces à ce stade, et le lien n'est pas toujours fait avec la maladie de Lyme. Des personnes souffrent ainsi de problèmes neurologiques, articulaires ou musculaires pendant plusieurs mois, voire des années.

PLS

Comment diagnostique-t-on la maladie lorsque l'érythème migrant a disparu ?

M. V.-T. : On recherche dans le sang de la personne des anticorps spécifiques des bactéries du groupe *Borrelia burgdorferi*, à l'aide de deux tests. Le premier est un test Elisa (*enzyme-linked immunosorbent assay*) : on passe au crible ces anticorps à l'aide d'une réaction immuno-enzymatique (quand un anticorps est reconnu à l'aide d'un antigène spécifique, une réaction enzymatique se déclenche, détectée par spectroscopie). Si ce test est positif, on confirme le diagnostic par un second test plus précis – un Western Blot. On incube le sang avec des bandelettes portant certaines protéines bactériennes contre lesquelles le patient a pu produire des anticorps. Si ces anticorps sont présents dans le sang, ils réagissent avec les bandelettes.

Si ces deux tests sont positifs, un diagnostic est posé sur la maladie de Lyme. Le problème, c'est que beaucoup de personnes se font piquer par des tiques, ont divers symptômes, mais présentent des tests négatifs et ne sont donc pas diagnostiquées comme ayant la maladie de Lyme. D'où la protestation des associations de malades.

PLS

Pourquoi ces tests ne détectent-ils pas tous les cas ?

M. V.-T. : Pour plusieurs raisons. La première est que plusieurs tests différents sont commercialisés pour détecter la maladie de Lyme et qu'on ne connaît pas leur spécificité et leur sensibilité. Pour avoir une sensibilité optimale en France, il faudrait que les tests Elisa soient fabriqués à partir des cinq espèces de bactéries connues pour y causer la maladie. Mais les fabricants ne sont pas tenus de préciser le contenu de leurs tests. Certains le font, mais pas tous, et les laboratoires d'analyse médicale choisissent ainsi leurs tests sans en connaître les performances.

UNE TIQUE *IXODES RICINUS* après un repas sanguin de plusieurs jours. Plus le repas est long, plus le risque de transmission d'agents pathogènes est grand.

En France, plus de vingt tests sont disponibles. Ils fonctionnent plus ou moins bien, mais quand vous allez dans un laboratoire pour un diagnostic, vous ne savez pas lequel est utilisé. Il y a un réel besoin de clarifier tout ça. C'est une des recommandations de l'avis donné par le Haut Conseil de la santé publique en 2014, en réponse à une saisine de la Direction générale de la santé : faire un tri dans tous les tests commercialisés pour déterminer lesquels sont les plus spécifiques et les plus sensibles pour détecter la maladie. L'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) mène en ce moment cette étude et devrait donner ses résultats en 2016.

PLS

Existerait-il d'autres tests plus efficaces, utilisés ailleurs, par exemple ?

M. V.-T. : Les associations de malades utilisent beaucoup le test de la goutte épaisse : on prend du sang au bout du doigt, on le met entre lame et lamelle et en regardant au microscope sur fond noir, on verrait les bactéries. Avec Christian Perronne, infectiologue à l'hôpital de Garches, nous avons voulu savoir si cette approche fonctionnait. Nous avons comparé selon ce protocole le sang d'individus sains et d'autres dont on savait qu'ils avaient la maladie. Résultat : on distinguait très bien des bâtonnets hélicoïdaux qui ressemblaient aux *Borrelia*, mais à la fois chez les individus sains et chez les malades. Le test n'est donc pas spécifique.

Nous ne savons pas si ces bâtonnets sont des bactéries, mais ce ne sont pas des *Borrelia*, car nous avons essayé de les identifier par des tests spécifiques mettant en évidence l'ADN des *Borrelia*, sans succès. Il s'agit peut-être d'autres bactéries : lorsqu'on mange, certaines bactéries du tube intestinal passent la barrière intestinale et se retrouvent de façon transitoire dans le sang, notamment des bactéries qui ressemblent aux *Borrelia*.

PLS

Quelles sont les autres raisons de la difficulté à diagnostiquer la maladie ?

M. V.-T. : Un autre problème est que les tiques ne transmettent pas que *Borrelia*, mais aussi beaucoup d'autres bactéries, des parasites, des virus. Or à l'heure actuelle, lorsque vous êtes piqué par une tique, le seul test qu'effectue le médecin est celui de *Borrelia*. Si vous êtes infecté par un autre agent pathogène, vous serez négatif pour la maladie de Lyme, mais quand même infecté par autre chose.

PLS

A-t-on déjà détecté d'autres maladies transmises par des tiques ?

M. V.-T. : Les symptômes à eux seuls ne permettent pas de reconnaître une maladie, car ils ne sont pas très spécifiques : état grippal, douleurs musculaires, fatigues intenses… En revanche, on sait que certaines bactéries hébergées par

BIBLIOGRAPHIE

M. Vayssier-Taussat *et al.*, **Emerging horizons for tick-borne pathogens : from the 'one pathogen-one disease' vision to the pathobiome paradigm,** *Future Microbiology*, prépublication en ligne, 10.2217/fmb.15.114, 2015.

M. Vayssier-Taussat *et al.*, **How a multidisciplinary 'One Health' approach can combat the tick-borne pathogen threat in Europe,** *Future Microbiology*, vol. 10, pp. 809-818, 2015.

M. Vayssier-Taussat, **Microorganismes transmis par les tiques : une association de malfaiteurs ?,** *Feuillets de Biologie*, n° 326, septembre 2015.

Haut conseil de la santé publique, **Borréliose de Lyme,** Rapport du groupe de travail, 28 mars 2014 : http://bit.ly/10iXalH

es tiques causent des maladies chez l'homme, elles *Anaplasma phagocytophilum*, responsable de l'anaplasmose granulocytaire, ou celles du genre *Bartonella*, responsables de la bartonellose. Récemment, nous avons recherché la présence de ces agents pathogènes chez environ 60 patients séronégatifs pour la maladie de Lyme, mais qui se souvenaient d'avoir été piqués par une tique et présentaient des symptômes tels que de grosses fatigues, des douleurs musculaires ou des problèmes neurologiques. Dans le sang de 10 % d'entre eux, nous avons détecté des bactéries *Bartonella*. La bartonellose est une maladie que l'on sait traiter, mais les médecins ne pensent pas à rechercher d'autres agents pathogènes que *Borrelia*.

PLS

Certaines maladies seraient-elles donc transmises sans érythème migrant ?

M. V.-T. : En effet. Les *Bartonella* ne donnent pas d'érythème migrant, donc on peut passer complètement à côté. Il y a aussi d'autres bactéries – les *Rickettsia* –, des virus, des parasites… Nous travaillons beaucoup sur les tiques et sur l'identification de ce qu'elles peuvent transmettre. À l'aide des méthodes nouvelles de séquençage à haut débit, on séquence sans *a priori* le génome des microorganismes portés par les tiques – leur pathobiome. On sait maintenant de manière assez globale ce que les tiques véhiculent. On s'est ainsi aperçu que 80 % de ces microorganismes étaient inconnus. Mais ce n'est pas parce que ces microorganismes sont dans les tiques qu'ils sont transmis et pathogènes. À l'heure actuelle, nous caractérisons ces microorganismes et essayons de voir si on les trouve chez des patients et s'ils peuvent être transmis par des tiques.

PLS

Comment améliorer le diagnostic ?

M. V.-T. : Avec le répertoire des pathogènes transmissibles par les tiques, on peut imaginer un test qui permet de détecter tous ces microorganismes en une seule fois. Des techniques sont disponibles pour cela, comme la détection sur puces à ADN. Cela commence à se faire en médecine vétérinaire. Avec une jeune entreprise, nous mettons au point des tests de diagnostic à haut débit qui permettent de détecter tous les agents pathogènes potentiels transmis par les tiques, avec l'idée de les développer pour les animaux : bovins, chevaux, chiens. Des tests similaires pourraient être conçus dans un avenir proche pour l'homme. Une réflexion est aussi menée à l'échelle européenne pour harmoniser les procédures de diagnostic, car actuellement chaque pays a ses propres règles d'identification.

PLS

N'y a-t-il pas aussi un manque d'information ?

M. V.-T. : Il y a en effet une méconnaissance de la maladie dans le monde médical. Par exemple, il existe des cas de borréliose de Lyme à peu près partout, même en Corse et dans le sud de la France, mais les médecins n'y connaissent pas cette maladie, car historiquement, elle est du nord-est de la France. On pense aussi que les tiques sont inactives en hiver, alors que dès qu'il y a un redoux, on peut être mordu. De plus, les tests sérologiques sont parfois faits trop tôt, lors de l'érythème, ce qui ne sert à rien car l'organisme n'a pas eu le temps de fabriquer des anticorps, et les tests sont négatifs. Les associations de patients demandent d'ailleurs que les maladies transmises par les tiques soient plus enseignées dans le cursus médical.

C'est aussi à nous, chercheurs, d'écrire des articles de vulgarisation destinés à la presse médicale. Le public doit aussi être plus informé, car la prévention est une façon très efficace de diminuer le nombre de maladies à tiques : à chaque fois que l'on se promène dans un endroit susceptible d'avoir des tiques, il faut s'examiner et enlever les tiques le plus tôt possible, car les risques de transmission augmentent avec la durée d'attachement de la tique. En général, la tique ne transmet pas tout de suite l'agent pathogène…

PLS

Quand peut-on espérer avoir une meilleure détection des maladies à tiques ?

M. V.-T. : Les laboratoires de recherche ont déjà beaucoup d'outils en main qui pourraient être utilisés pour développer des tests diagnostiques, ce qui est fait d'ailleurs en santé animale. Après, il faut que des entreprises privées souhaitent développer ces tests chez l'homme. Y a-t-il un marché ? Ce n'est pas mon domaine. Notre mission n'est pas de commercialiser des kits de diagnostic. Mais les outils sont là, prêts à être utilisés. ■

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

DARWIN L'ORIGINAL

JUSQU'AU 31 JUIL... 2016

...de la Villette - ...s.fr - #Darwi...

L'EXPO

cité des sciences & de l'industrie

citron pressé - RCS B492973368. Crédits photo : istock

EN COLLABORATION AVEC

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

AVEC LE SOUTIEN DE

Slate.fr SCIENCE&VIE 20 minutes.fr arte i TELE Le Point france inter

Actuellement en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

ARMAGEDDON
D'ici à 2022, nous pourrons éviter la destruction de la planète Terre par un astéroïde

TC[illegible]OURI E[illegible]
Les toutes dern[illegible] actualités des missions *Rosetta* et *New Horizons*

DOSSIER POUR LA SCIENCE - ASTRONOMIE - PLANÈTE X - HISTOIRE DE LA TERRE - PLANÉTOLOGIE

Planètes naines
Météorites
Astéroïdes
Comètes

M 01930 - 90 - F: 7.50 € - RD

BEL : 8,9 € - LUX : 12,5 SCED-DOM/S : 8,9 € - LUX : 8,5 € - MAR : 100 MAD-TTC - TUN : 2 250 TND - TUN /S : 1 260 XPF - POM E.CONT. : 8,5 € - CH : 16,2 CHF

CES OBJETS CÉLESTES
QUI NOUS RACONTENT

LES DÉBUTS DU SYSTÈME SOLAIRE

N° 90 Janvier-Mars 2016

pourlascience.fr

www.pourlascience.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Manifester sans lever le petit doigt

Avec la pétition électronique, les citoyens disposent d'un outil puissant pour exprimer leur opinion. Les gouvernements devront apprendre à en tenir compte.

Pour montrer qu'ils étaient nombreux à soutenir une cause, les citoyens, au XXe siècle, avaient deux protocoles à leur disposition : les manifestations et les pétitions. Ces moyens d'expression étaient l'un et l'autre très coûteux en énergie. Communiquer un seul bit d'information, au cours d'une manifestation, demandait souvent de marcher plusieurs kilomètres en s'époumonant à crier des slogans qui, du fait de leur répétitivité, ne véhiculaient en eux-mêmes presque aucune information. Une pétition nécessitait certes moins d'énergie de la part de ses signataires, mais non de la part de ses organisateurs, qui devaient souvent solliciter individuellement des milliers de personnes pour obtenir quelques centaines de signatures.

Outre leur coût élevé, ces protocoles introduisaient une discrimination géographique. Les habitants des zones rurales, par exemple, étaient moins sollicités pour signer des pétitions que ceux des zones urbaines et ils étaient contraints de voyager, parfois loin de chez eux, quand ils voulaient manifester.

La baisse des coûts de communication, amorcée avec le développement du réseau Internet à la fin des années 1960 et du Web au début des années 1990, a bouleversé nos façons d'échanger des idées. Elle a aussi transformé les actions militantes. Les modifications les plus visibles ont été la diffusion d'informations par le courrier électronique, les sites web, les blogs, les microblogs, les réseaux sociaux... Ces moyens de faire circuler les idées ont été utilisés d'abord par les organisations politiques qui avaient le plus faible accès à la presse traditionnelle, puis ils se sont généralisés à toutes les organisations politiques. Cependant, ces différents protocoles véhiculent presque exclusivement de l'information en provenance de ces organisations vers les citoyens. La communication est à sens unique.

Une transformation, peut-être plus importante parce qu'elle permet de véhiculer de l'information non pas en direction mais en provenance des citoyens, a été la possibilité de signer des pétitions en ligne, c'est-à-dire de signifier son soutien à une cause d'un simple clic, en déplaçant son pouce de quelques millimètres sur l'écran de son téléphone.

Les rares consultations publiques organisées avant le vote d'une loi ont encore des impacts minimes

Parce qu'elles accroissent la possibilité pour les citoyens de s'exprimer, ces pétitions en ligne rassemblent souvent des foules gigantesques. Ainsi, il y a quelques mois, une pétition de soutien à une femme homosexuelle nigériane, réfugiée au Royaume-Uni et menacée d'expulsion, a rassemblé 244 357 signatures, ce qui pour une telle cause est astronomique. À la suite de cette pétition, les autorités britanniques ont fini par accorder l'asile à cette femme.

Même si l'attitude des autorités britanniques a été remarquable dans ce cas, il n'est pas certain que les gouvernements et les assemblées législatives aient complètement pris la mesure de cette transformation des protocoles qui leur permettent d'échanger de l'information avec les citoyens qu'ils représentent.

Ainsi, les rares consultations publiques organisées avant le vote d'une loi ont encore des impacts minimes sur le texte de ces lois. De plus, une manifestation de quelques dizaines de milliers de personnes, surtout si elles démontent ou endommagent des installations publiques, déstabilise davantage un gouvernement qu'une pétition en ligne qui rassemble des centaines de milliers de signatures.

Toutefois, les choses vont peut-être changer : les différentes mesures de restriction des libertés publiques, qui se sont succédé depuis la fin du XXe siècle, aboutissent aujourd'hui à une restriction du droit de manifestation, comme nous l'avons vu à Paris pendant la COP21 et la mise en place de l'état d'urgence. De même que les grèves des postes ont pu favoriser le développement du courrier électronique ou de la télécopie, il est probable que ces mesures propulsent l'action militante vers le Web, notamment vers les pétitions en ligne, que les gouvernements auront bien plus de mal à interdire et qu'ils devront mieux prendre en compte.

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

© Pour la Science - n° 460 - Février 2016

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Tu ne spoileras point !

Les conditions drastiques imposées aux critiques de cinéma pour assister à l'avant-première de Star Wars *7 illustrent l'importance grandissante de la fiction dans nos sociétés.*

La sortie du dernier épisode de *Star Wars* a suscité une telle masse de commentaires qu'il est vain d'espérer dire quoi que ce soit d'original sur le sujet. Pourtant, un détail a attiré mon attention et me paraît être passé relativement inaperçu. Sa trivialité nous a sans doute empêchés de le voir pour ce qu'il est : un symptôme fondamental de l'époque et peut-être de notre destin collectif.

Un jour avant la sortie du *blockbuster*, le quotidien *Le Monde* a fait savoir qu'il n'en publierait pas de critique. Pourquoi ? Parce que la firme Disney, qui détient à présent les droits d'exploitation du *space opera* imaginé par George Lucas, a posé des conditions d'accès à l'avant-première qui ont paru inacceptables au journal. De toutes ces conditions, la plus gênante et la plus révélatrice était celle-ci : « Je reconnais que toute révélation de ma part concernant ce film à des personnes n'ayant pas assisté à la projection constituerait un préjudice donnant lieu à réparation. »

Cette clause est en effet intimidante pour toute personne souhaitant écrire une critique du film. Au-delà, elle constitue le fait de « spoiler » (issu de l'ancien français *espoillier*, ce terme signifie révéler les éléments d'une histoire et aboutir ainsi à gâcher le plaisir de celui qui ne la connaissait pas) en une activité passible d'une action devant les tribunaux !

C'est là une curiosité sociologique qui montre combien la narration fictionnelle a pris de l'importance dans nos vies. Que l'on y songe un instant : combien de temps passons-nous à savourer des histoires que nous savons fausses – films, romans, pièces de théâtre, séries télévisées, jeux vidéo, etc. ?

En quelques siècles, le temps moyen que les humains consacrent à la fiction a progressé de façon vertigineuse, pour deux raisons. La première est l'énorme augmentation de la productivité du travail et de l'espérance de vie. Il en résulte globalement un temps de cerveau disponible de plus en plus important lui aussi.

LA FICTION OCCUPANT une place croissante, la protection des œuvres et les profits associés va jusqu'à l'excès.

La deuxième raison est que nous avons une appétence naturelle pour la fiction, qui constitue une nourriture presque vitale pour notre cerveau. C'est du moins ainsi qu'on peut lire les contributions des neurosciences sur la question.

Par exemple, l'Américain Jonathan Gottschall, à la croisée de la littérature et de la théorie de l'évolution, nous dépeint comme des « animaux narratifs » et considère la fiction comme un élément aussi important pour l'homme que l'eau pour le poisson. Le neuroscientifique Michael Gazzaniga, de l'université de Californie à Santa Barbara, ne dit pas autre chose dans son dernier ouvrage *Tales from Both Sides of the Brain,* en décrivant comment notre cerveau s'abandonne compulsivement à une narration perpétuelle de son environnement.

Cette passion naturelle pour la fiction ne nous permet pas seulement de lire le monde, mais aussi de comprendre autrui. Pour l'animal éminemment social que nous sommes, c'est fondamental. Comme l'explique Lisa Zunshine, de l'université du Kentucky, qui elle aussi s'intéresse à la littérature en cogniticienne, notre appétence pour le récit est un fruit de l'évolution car il nous « entraîne » à comprendre les intentions d'autrui.

Il ne faudra donc pas s'étonner si la condamnation de la privation de ce plaisir narratif inspire un onzième commandement. Avec *Star Wars*, c'est la première fois qu'au-delà des insultes, le spoileur se voit menacé juridiquement. La libération du temps de cerveau disponible n'en étant peut-être qu'à ses débuts, qui sait si nous n'allons pas entrer dans un paradis cauchemardesque où les hommes, affranchis en partie de la contrainte du travail, préféreront, à l'exploration du monde réel par la science, celui de mondes virtuels par le divertissement ? Qui peut dire alors si le crime de spoilage ne finira pas par valoir de la prison ferme ? ■

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

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

Offre Intégrale

8,20€/mois

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 42 % 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 retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnement - 19 rue de l'Industrie 67402 Illkirch Cedex

POUR LA SCIENCE

AS2460

1. MA FORMULE

❑ **OUI**, je m'abonne à l'offre « intégrale » pour 8,20€ par mois ou 99€ pour 1 an incluant le magazine *Pour la Science* (12 nos/an) + son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 nos/an) et l'accès numérique illimité aux archives sur www.pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tél. : (pour le suivi client (facultatif))

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

@

3. MON MODE DE RÉGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **8,20€ par mois*** Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC. (IPV8E20

POUR LA SCIENCE

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

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN

BIC

Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

À

Date

Signature :

NOM DU CRÉANCIER **ICS** N° FR92ZZZ426900

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

Les coordonnées de votre établissement bancaire

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 99€****. (I1A99

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ❑ Par carte bancaire N°

Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

Offre numérique, valable sans limitation de zone géographique. L'abonnement en prélèvement est renouvelé tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 1 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr. **Tarifs valables uniquement en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger merci de consulter notre site. 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** ❑

Tous droits réservés pour tous pays / All rights reserved

Lu sur SciLogs.fr
Les blogs scientifiques de Pour la Science

« C'est mon dernier mot, Jean-Pierre : le Soleil »

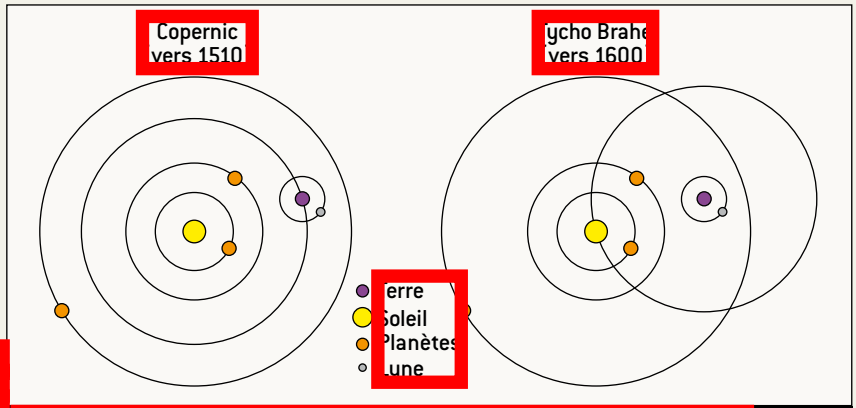
par Richard Taillet, sur le blog Signal sur bruit

Un candidat du jeu télévisé « Qui veut gagner des millions ? » fut confronté il y a quelques années à la question « Qu'est-ce qui gravite autour de la Terre ? La Lune, le Soleil, Mars ou Vénus ? ». Après une longue hésitation, il répondit « le Soleil » et fut éliminé. La vidéo suscite depuis des commentaires moqueurs sur les réseaux sociaux (« Comment peut-on ne pas savoir répondre à cette question ? »). Ces commentaires me font plus réagir que l'erreur elle-même. Ils m'évoquent des questionnements pédagogiques auxquels est confronté tout enseignant en mécanique.

Si l'on part du principe que le candidat sait ce que signifie « graviter » (ce n'est pas évident !), la question peut être entendue comme « Qu'est-ce qui décrit une trajectoire autour de la Terre ? ». Mais même ainsi reformulée, la question est incomplète. Une trajectoire n'est définie que si l'on indique un référentiel, c'est-à-dire notamment un point par rapport auquel on mesure la position. La trajectoire d'un trognon de pomme que vous jetez par la fenêtre de votre voiture est très différente pour vous, pour la vache sur le bord de la route ou pour le ver dans la pomme.

Il ne s'agit pas de pinailler sur la formulation de la question posée par Jean-Pierre Foucault, mais de comprendre en quoi « la Lune » est une réponse plus pertinente que « le Soleil » (car c'est le cas). Et « Tout le monde devrait le savoir » n'est pas une explication valable ! Durant plusieurs siècles après Ptolémée, on « savait » que la Terre était au centre de l'Univers, même si on comprend aujourd'hui que cela n'a pas de sens. La science est trop souvent associée à des savoirs, alors que chaque énoncé scientifique devrait être contextualisé : comment l'a-t-on obtenu ? Comment a-t-il été vérifié ? Comment pourrait-il être mis en défaut ? Quel est son domaine de validité ?

Mais revenons à la question qui fait gagner des millions (ou pas). La réponse attendue, « la Lune », découle naturellement de la vision copernicienne du Système solaire. Cependant, « le Soleil » est une réponse moins simple à éliminer qu'on pourrait le penser. Depuis un observateur sur Terre, la Lune et le Soleil décrivent tous deux une trajectoire à peu près circulaire autour de la Terre. Pourquoi serait-il pertinent de considérer la Terre comme référence quand on étudie le mouvement de la Lune, mais pas quand on étudie celui du Soleil ? La réponse « parce que les autres planètes tournent autour du Soleil » botte en touche, car cette question serait tout aussi valide dans un système constitué uniquement de la Terre, du Soleil et de la Lune. La réponse « parce que la Terre attire la Lune alors qu'elle est attirée par le Soleil » n'est pas satisfaisante non plus, car la Terre attire autant le Soleil que l'inverse, et même plusieurs centaines de fois plus qu'elle n'attire la Lune !



Le modèle héliocentrique de Copernic (ici simplifié, car les planètes décrivent en fait des épicycles, des cercles dont les centres décrivent eux-mêmes des trajectoires circulaires) et le modèle géocentrique de Tycho Brahe *(idem)* sont équivalents du point de vue géométrique et cinématique.

Historiquement, le modèle héliocentrique, proposé par Copernic au début du XVI[e] siècle pour remplacer le modèle géocentrique de Ptolémée datant du II[e] siècle, est équivalent, du point de vue de la position relative et de la vitesse des corps, au modèle géocentrique de Tycho Brahe, selon lequel la Lune et le Soleil, accompagné de son cortège de planètes, décrivent des orbites autour de la Terre considérée comme fixe. L'un des messages de Copernic, c'est qu'on peut aussi considérer que la Terre tourne autour du Soleil, pas qu'on doit le faire.

C'est Newton qui, avec ses lois de la mécanique, permet de franchir ce dernier pas. Sans entrer dans les détails, ces lois permettent de montrer que deux corps soumis à une force de gravitation mutuelle sont en orbite autour de leur centre de gravité commun.

Or le centre de gravité du Système solaire est situé juste à la surface du Soleil, tandis que celui du système Terre-Lune est situé dans la Terre. C'est finalement en ce sens qu'il est plus naturel de considérer que c'est la Lune qui gravite autour de la Terre, et non le Soleil. Et c'est mon dernier mot ! ■

Richard TAILLET est professeur à l'université Savoie Mont Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).

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

n°459 – janvier 2016
Réf. M0770459

n°458 – décembre 2015
Réf. M0770458

n°457 – novembre 2015
Réf. M0770457

n°456 – octobre 2015
Réf. M0770456

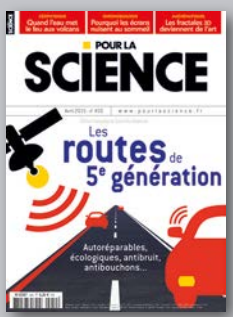
n°455 – septembre 2015
Réf. M0770455

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

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 : pourlasciencevnc@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 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format choisi :

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

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

TOTAL A REGLER = ... €

J'indique mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
CP : Ville :
Pays : Tel :

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* : ... @ ...
à remplir en majuscules

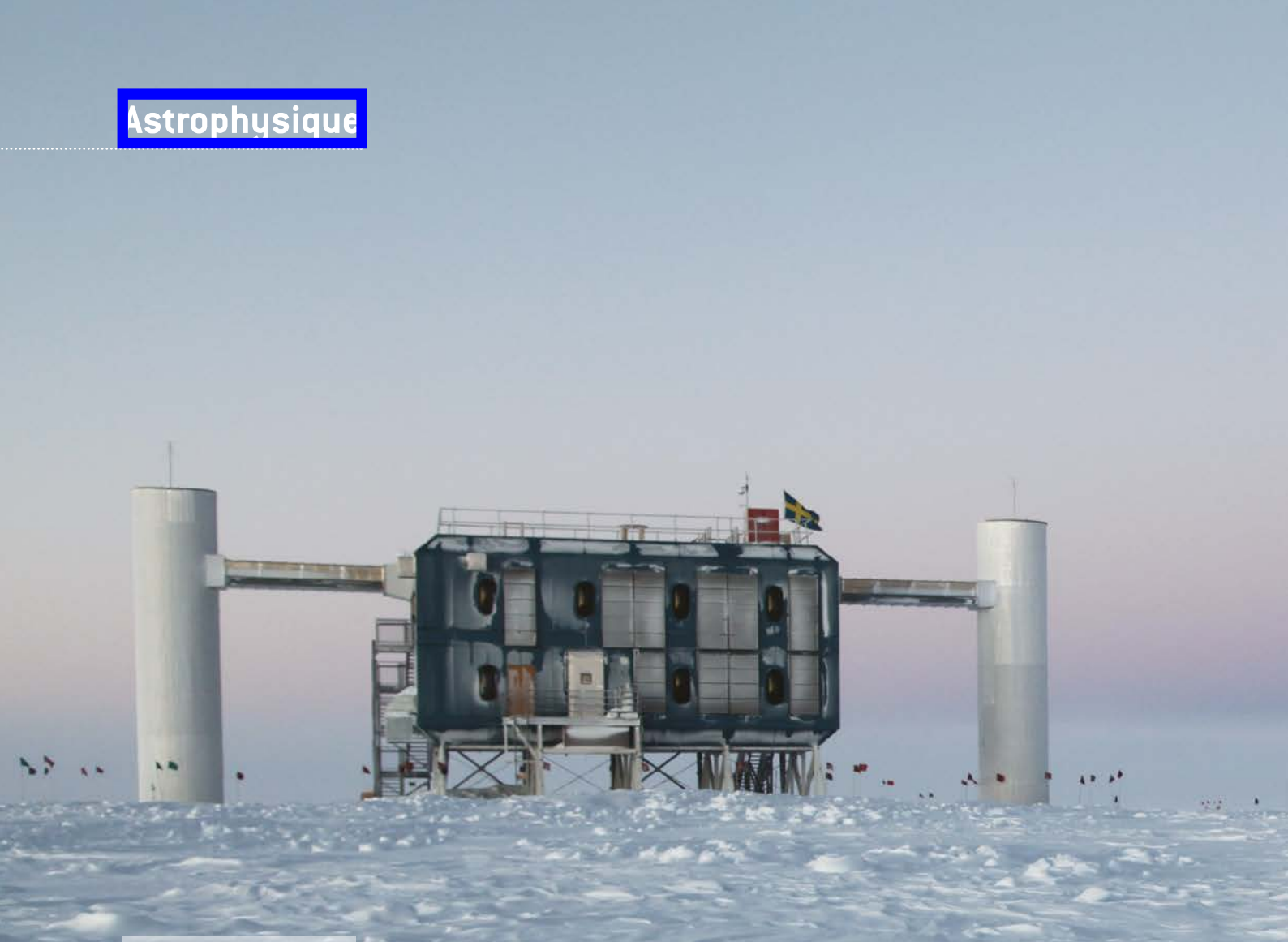
Je choisis mon mode de règlement :

❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
N°
Date d'expiration Code de sécurité

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** ❑

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR www.pourlascience.fr



L'ESSENTIEL

- L'expérience *IceCube* traque les neutrinos de haute énergie. Elle utilise une partie de la calotte de l'Antarctique comme détecteur.
- Les physiciens ont enregistré des dizaines de ces neutrinos jamais détectés auparavant.
- La direction de ces particules pointe, dans le ciel, vers l'événement cosmique qui les produit : c'est une nouvelle façon de faire de l'astronomie.
- Les physiciens espèrent utiliser ces neutrinos cosmiques pour étudier les supernovæ et les trous noirs au centre des galaxies.

LES NEUTRINOS du bout du monde

Francis Halzen

Télescope d'un nouveau type en opération au pôle Sud, *IceCube* enregistre des neutrinos de très haute énergie provenant des confins de l'Univers. Et qui aideront à résoudre certaines énigmes cosmiques.

L'OBSERVATOIRE DE NEUTRINOS *IceCube* est installé en Antarctique, à proximité de la base américaine Amundsen-Scott, située à 250 mètres du pôle Sud. Ses capteurs optiques sont profondément enfouis dans la glace.

L'AUTEUR

Francis HALZEN est professeur de physique à l'université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis. Il dirige l'expérience *IceCube*.

Les neutrinos de haute énergie

seraient produits par des événements violents dans la Galaxie et au-delà

En 2010, l'une des expériences de physique les plus ambitieuses a été lancée au pôle Sud. Enfoui dans la glace de l'Antarctique, le détecteur de particules géant *IceCube* enregistre le passage de neutrinos de haute énergie : des particules élémentaires insaisissables qui traversent presque tout ce qu'elles rencontrent sans laisser de trace. Le projet vise à utiliser les neutrinos pour étudier des phénomènes cosmiques lointains, en particulier certains processus parmi les plus violents dont on pense qu'ils produisent les rayons cosmiques, ces particules qui bombardent en permanence la Terre. *IceCube* est donc un télescope astronomique d'un nouveau type.

Les neutrinos sont des particules furtives. Leur masse est presque nulle et ils se propagent à des vitesses proches de celle de la lumière dans le vide. Leur charge électrique est nulle, ce qui explique pourquoi ils interagissent si rarement avec la matière. Lorsqu'ils arrivent sur Terre, la plupart poursuivent leur route comme si de rien n'était, filant à travers la planète. *IceCube* s'intéresse surtout aux neutrinos de haute énergie, d'autant plus rares et difficiles à observer. Nous n'avons donc pas été surpris que les données des premières années, obtenues alors que le détecteur était encore en construction, n'aient rien révélé d'extraordinaire. Mais en 2012, tout cela a changé.

Lors d'une téléconférence de routine entre membres de l'équipe, des motifs que nous n'avions jamais vus auparavant se sont affichés sur nos écrans. Les signaux reflétaient la détection de deux neutrinos d'une énergie plus de mille fois supérieure à celle des neutrinos les plus énergétiques jamais produits par un accélérateur sur Terre, et près de un milliard de fois à celle des neutrinos régulièrement émis par le Soleil. Une joie intense a envahi la salle quand nous avons compris que nous avions sous les yeux un phénomène qui allait changer la donne. Dans l'euphorie du moment, l'un de nos étudiants en thèse a surnommé Bert et Ernie les deux particules, comme les personnages de l'émission télévisée pour enfants *1, rue Sésame* (ces noms ont l'avantage d'être plus faciles à retenir et à reconnaître que les longues chaînes de chiffres que nous attribuons d'ordinaire aux événements de neutrinos).

Il nous a fallu encore une année et une analyse totalement repensée des mêmes données pour nous assurer que nous avions bien affaire à ce que nous pensions : les premiers pixels d'une nouvelle carte de l'Univers dessinée par les neutrinos de haute énergie. Depuis, nous avons enregistré un total de 54 neutrinos de haute énergie, et beaucoup ont reçu des noms de Muppets, parmi lesquels Big Bird avait une énergie double de celle d'Ernie et de Bert.

Nous cherchons maintenant à identifier l'endroit du ciel d'où proviennent ces neutrinos, et comment ils ont acquis une telle énergie. Nous soupçonnons des événements cosmiques d'une extrême violence, telles des supernovæ ou d'autres explosions stellaires nommées sursauts gamma, deux phénomènes, survenus loin du Système solaire, qui produiraient des rayons cosmiques en grande quantité. Si nous parvenons à confirmer le lien entre les neutrinos de haute énergie et ces sources probables de rayons cosmiques, nous ouvrirons une nouvelle fenêtre sur le monde pour observer et mieux comprendre la physique de certains événements parmi les plus spectaculaires du cosmos.

Des particules imperturbables

Les rayons cosmiques, qui bombardent constamment la Terre depuis l'espace, sont constitués de protons et d'autres particules chargées de très haute énergie. Plus d'un siècle après leur découverte, nous ignorons toujours quels processus les engendrent. Quand ils arrivent sur Terre, nous ne pouvons pas déterminer leur lieu d'origine dans l'Univers parce que ces particules ne se déplacent pas en ligne droite. En effet, du fait de leur charge électrique, elles sont déviées par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques. Leur parcours s'en trouve brouillé et il est impossible de savoir quel chemin ils ont parcouru à travers l'espace. Mais, par chance, la théorie suggère qu'ils interagissent aussi avec des photons sur leur lieu de naissance, et produisent ainsi des neutrinos.

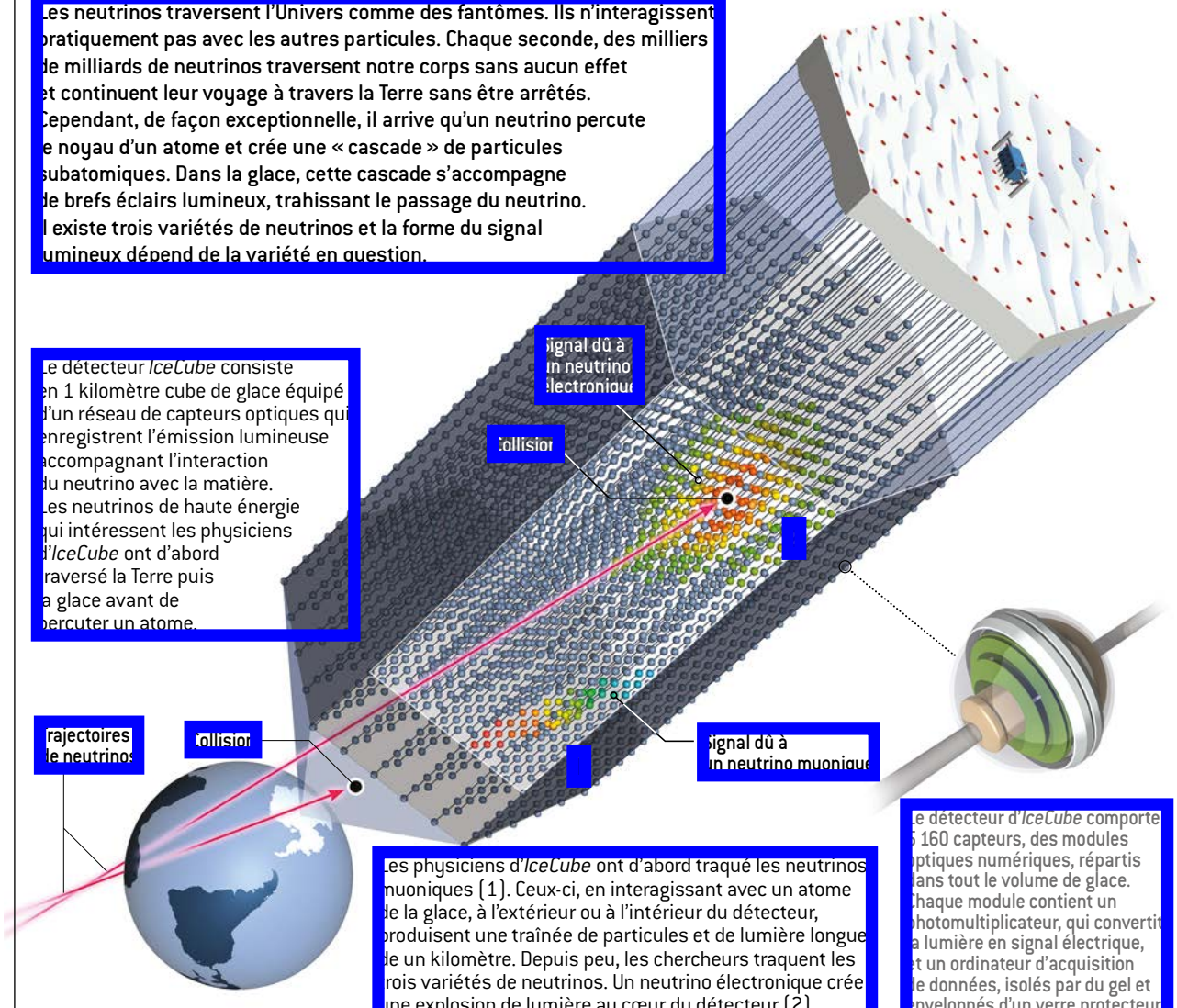
Les neutrinos, eux, se déplacent en ligne droite, ignorant la matière et les champs magnétiques sur leur passage. Par conséquent, les neutrinos pointent directement vers leur source et celle des rayons cosmiques.

Les astronomes ont quelques idées sur les mécanismes qui donnent naissance aux rayons cosmiques, mais ils ont besoin de

COMMENT CHASSE-T-ON LES FANTÔMES EN ANTARCTIQUE ?

Les neutrinos traversent l'Univers comme des fantômes. Ils n'interagissent pratiquement pas avec les autres particules. Chaque seconde, des milliers de milliards de neutrinos traversent notre corps sans aucun effet et continuent leur voyage à travers la Terre sans être arrêtés. Cependant, de façon exceptionnelle, il arrive qu'un neutrino percute le noyau d'un atome et crée une « cascade » de particules subatomiques. Dans la glace, cette cascade s'accompagne de brefs éclairs lumineux, trahissant le passage du neutrino. Il existe trois variétés de neutrinos et la forme du signal lumineux dépend de la variété en question.

Le détecteur *IceCube* consiste en 1 kilomètre cube de glace équipé d'un réseau de capteurs optiques qui enregistrent l'émission lumineuse accompagnant l'interaction du neutrino avec la matière. Les neutrinos de haute énergie qui intéressent les physiciens d'*IceCube* ont d'abord traversé la Terre puis la glace avant de percuter un atome.



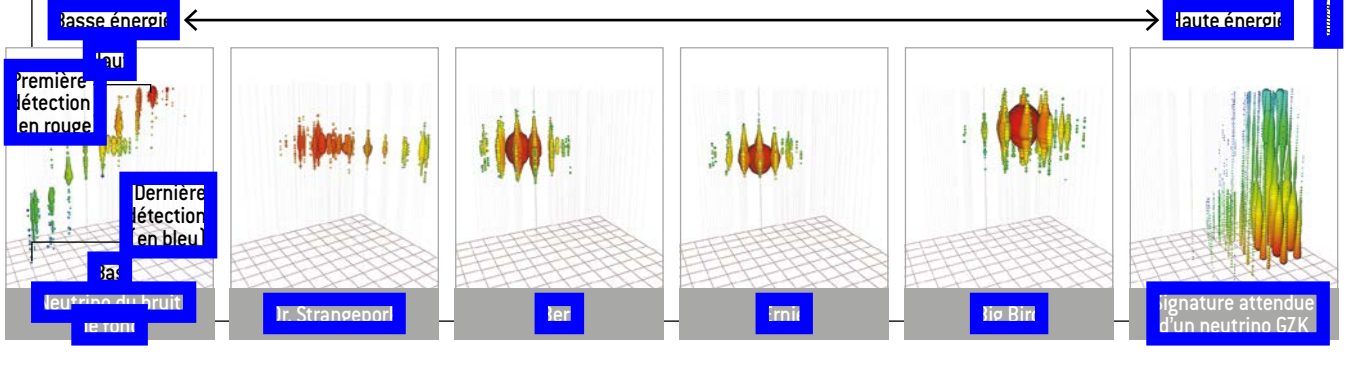
Le détecteur d'*IceCube* comporte 5 160 capteurs, des modules optiques numériques, répartis dans tout le volume de glace. Chaque module contient un photomultiplicateur, qui convertit la lumière en signal électrique, et un ordinateur d'acquisition de données, isolés par du gel et enveloppés d'un verre protecteur.

Les physiciens d'*IceCube* ont d'abord traqué les neutrinos muoniques (1). Ceux-ci, en interagissant avec un atome de la glace, à l'extérieur ou à l'intérieur du détecteur, produisent une traînée de particules et de lumière longue de un kilomètre. Depuis peu, les chercheurs traquent les trois variétés de neutrinos. Un neutrino électronique crée une explosion de lumière au cœur du détecteur (2).

Des neutrinos de différentes énergies

La plupart des neutrinos que détecte *IceCube* sont du « bruit de fond » liés à des processus se déroulant dans l'atmosphère. Leur énergie est assez basse et ils traversent le détecteur de haut en bas *(figure de gauche)*. Le taux de détection est de 3 000 par seconde.

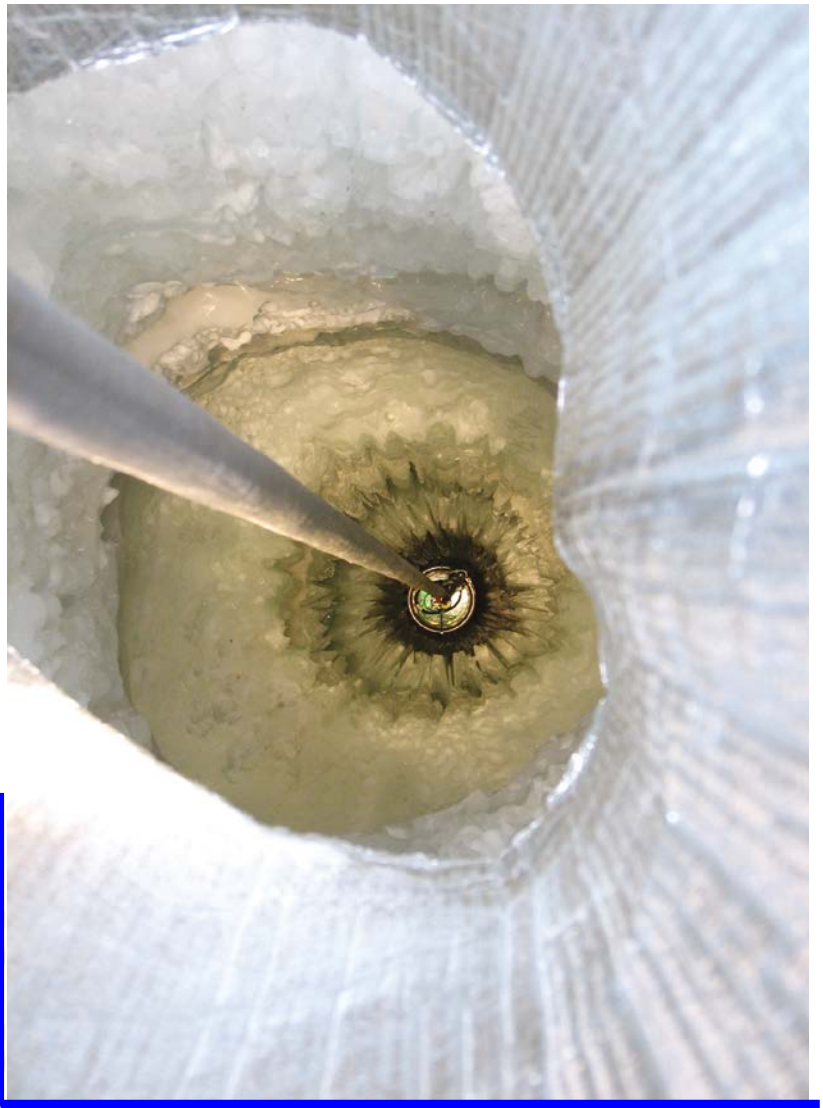
Les neutrinos cosmiques arrivent *a priori* de n'importe quelle direction. Les neutrinos muoniques cosmiques créent des traînées (tel l'événement Dr. Strangepork), alors que les neutrinos électroniques ou tauiques cosmiques apparaissent comme des explosions de lumière (Bert, Ernie, Big Bird). Les physiciens traquent aussi des signaux de neutrinos GZK, produits par des interactions avec le fond diffus cosmologique. L'énergie d'un tel neutrino serait un millier de fois celle des autres neutrinos cosmiques *(figure de droite)*.



nouvelles données pour confirmer ou écarter ces hypothèses. Première source probable des rayons cosmiques : la mort d'étoiles massives. À la fin de sa vie, quand son cœur n'est plus en mesure de supporter sa masse, une grosse étoile s'effondre sur elle-même en un objet dense, tels une étoile à neutrons ou un trou noir. L'effondrement s'accompagne d'une explosion très brillante (une supernova). Pendant ce processus, une grande part de l'énergie gravitationnelle de la matière qui tombe vers le centre de l'astre est convertie en une poussée qui accélère des particules, sans doute sous la forme d'ondes de choc.

Les vestiges de supernovæ ont été proposés comme source probable de rayons cosmiques dès 1943 par les astronomes Walter Baade et Fritz Zwicky ; soixante-dix ans plus tard, l'hypothèse est toujours débattue. Environ trois explosions de supernovæ par siècle dans la Voie lactée suffiraient pour expliquer le flux constant de rayons cosmiques observé dans la Galaxie.

Les rayons cosmiques extragalactiques, qui, comme leur nom l'indique, ont leur origine en dehors de la Voie lactée, sont en général plus énergétiques que les rayons cosmiques issus d'une source plus proche. Cela suppose qu'ils sont produits par des événements encore plus violents que les supernovæ, tels les sursauts gamma. Ces phénomènes, encore plus brillants que les supernovæ classiques, sont encore mal compris ; ils se produisent probablement au cours de l'effondrement d'une étoile de très grande masse dans des conditions extrêmes.



ENFOUI À ENVIRON 1 500 MÈTRES sous la surface de la calotte glaciaire de l'Antarctique, le détecteur *IceCube* comprend 86 rangées de capteurs. Pour installer chaque rangée, il a fallu la faire descendre dans un trou creusé par une perforatrice à injection d'eau chaude.

Autre source théorique de rayons cosmiques extragalactiques, les noyaux actifs de galaxies sont une classe de galaxies qui auraient en leur centre un trou noir supermassif où tombent de grandes quantités de matière. Cet environnement extrême entraînerait l'accélération de certaines particules jusqu'à des vitesses assez élevées pour qu'elles s'échappent de la galaxie et deviennent ainsi des rayons cosmiques.

La détection des neutrinos issus de ces processus est un défi pour les physiciens. Pour compenser le fait que ces particules ont une très faible probabilité d'interagir avec la matière, il faut construire des détecteurs gigantesques. L'expérience *IceCube* couvre un volume de près de 1 kilomètre cube. Elle utilise la glace de la calotte antarctique qui est un parfait détecteur naturel de neutrinos. Lorsque, exceptionnellement, un neutrino interagit avec un atome de la glace, celle-ci s'illumine en libérant une « cascade » de particules chargées qui émettent de la lumière bleue. Ce « rayonnement Tcherenkov » parcourt des centaines de mètres à travers la glace pure ultratransparente. Afin de le détecter, les physiciens ont disposé 5 160 capteurs optiques dans tout le volume du détecteur situé à 1 500 mètres au-dessous de la surface du pôle Sud, où la glace est âgée de près de 100 000 ans.

Des cascades de lumière

Les capteurs cartographient avec précision la cascade de lumière produite par les particules créées lorsqu'un neutrino entre en collision. La forme de la cascade révèle le type (on parle de « saveur ») du neutrino, son énergie et la direction d'où il provient. Les énergies d'Ernie, Bert et tous les autres neutrinos que nous avons vus jusqu'à présent étaient de l'ordre du pétaélectronvolt (PeV), soit 10^{15} électronvolts (eV), ce qui en fait les neutrinos les plus énergétiques jamais observés. Ernie et Bert avaient des énergies respectives de 1,07 PeV et de 1,24 PeV ; ils ont produit des cascades de lumière (d'environ 100 000 photons) longues de plus de 500 mètres. Par comparaison, l'énergie des particules accélérées par le LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern) près de Genève, est de l'ordre du téraélectronvolt (TeV), soit 10^{12} eV, donc trois ordres de grandeur plus faible.

Les neutrinos enregistrés par *IceCube* ont une énergie si grande qu'ils proviennent certainement d'une source cosmique. Le

Un télescope à neutrinos dans la mer Méditerranée

La découverte par *IceCube* de neutrinos cosmiques de haute énergie a véritablement révélé l'intérêt de l'astronomie fondée sur les neutrinos. Elle n'est cependant pas la seule [illegible] *KM3NeT*, sont installées dans la mer Méditerranée.

Le télescope *IceCube* utilise la calotte antarctique comme milieu de détection, mais d'autres projets ont considéré l'eau du fond des océans dont les propriétés optiques (notamment une diffusion de la lumière plus faible) offrent un meilleur pouvoir de pointage de la direction du neutrino que la glace. Dans les années 1980, les physiciens du projet américain *Dumand* ont tenté d'installer un détecteur au large de Hawaï, dans l'océan Pacifique, mais l'immersion dans les grands fonds était trop complexe.

En Europe, dans les années 1990, la collaboration *Antares* a repris le flambeau en proposant le déploiement d'un télescope sous-marin au large des côtes varoises, par 2 500 mètres de fond. Achevé en 2008, le détecteur comprend 12 lignes de détection de 450 mètres de haut *(voir la figure, à gauche)*. Le volume de détection est bien inférieur à celui d'*IceCube* ; pourtant, les résultats d'*Antares* ont servi à réduire l'incertitude sur l'origine des neutrinos enregistrés par *IceCube*. En effet, le volume effectif d'*Antares*, pour les neutrinos muoniques, est similaire à celui d'*IceCube* pour les neutrinos électroniques, mais *Antares* offre une meilleure résolution angulaire. Ainsi, l'analyse des données a permis d'exclure que l'accumulation d'événements proches du centre galactique *(voir la figure page 30)* puisse provenir d'une source unique.

Les deux expériences sont ainsi complémentaires et l'équipe d'*Antares* compte établir de nouvelles limites sur les autres saveurs de neutrinos pour lesquels la résolution angulaire est inférieure à 3 degrés (à comparer à 0,5 degrés dans la glace).

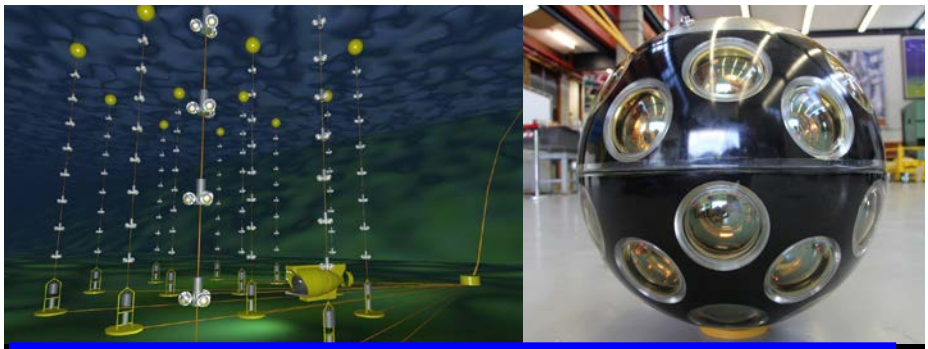
Antares fournit aussi des informations quant à la nature des sources qui produisent les neutrinos les plus énergétiques détectés par *IceCube* (Ernie, Bert et Big Bird). Ainsi, certains noyaux actifs de galaxies connus pourraient être des sources, mais davantage de données seront nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Une autre stratégie pour identifier les sources de neutrinos consiste à rechercher des neutrinos en coïncidence spatiale ou temporelle avec d'autres messagers cosmiques tels que les rayons gamma ou les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Cette approche multimessagers est activement poursuivie par *Antares*. Le dernier exemple en date était l'alerte lancée à la communauté des astrophysiciens le 1er septembre 2015 après l'observation d'un candidat neutrino de haute énergie suivie d'une activité intense en rayons X dans le même champ de vue. Après une étude plus poussée, la coïncidence s'est malheureusement révélée fortuite !

Il faudra peut-être attendre la construction d'un détecteur plus grand dans la mer Méditerranée pour identifier les sources. Forte du succès d'*Antares*, la construction d'un tel détecteur a d'ores et déjà débuté. Le successeur, *KM3NeT*, comporte deux sites : l'un *(KM3NeT/Arca)*, au sud de la Sicile, est optimisé pour la détection de neutrinos cosmiques avec un volume instrumenté de plusieurs kilomètres cubes ; l'autre *(KM3NeT/Orca)*, proche de celui d'*Antares*, est consacré à la mesure des propriétés des neutrinos. Ce dernier aura un maillage de photodétecteurs plus dense afin d'abaisser le seuil de détection en énergie au gigaélectronvolt. La première ligne a été immergée avec succès le 3 décembre 2015, et la construction pourrait être achevée à l'horizon de 2020.

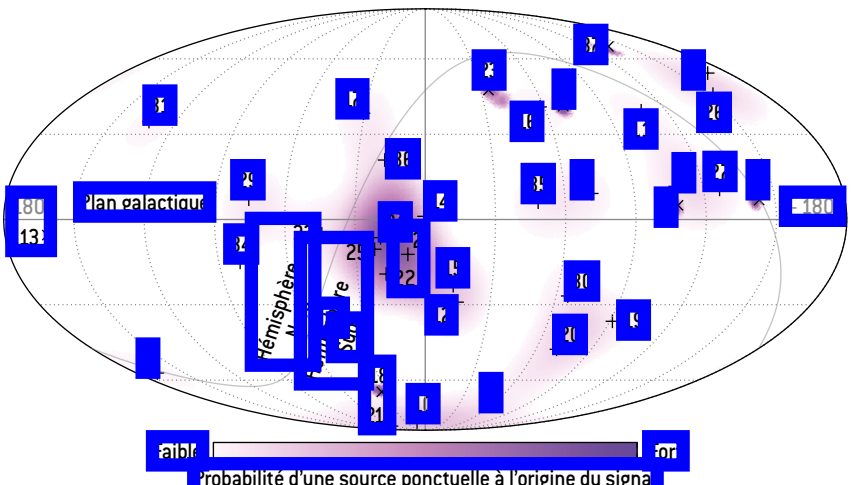
Les modules optiques de *KM3NeT* comportent 31 petits photomultiplicateurs *(voir la figure, à droite)* au lieu d'un seul, plus grand, dans les modules d'*Antares* et d'*IceCube*. Les avantages sont nombreux : une plus grande surface de collecte, une meilleure directionnalité, un meilleur comptage des photons et donc une plus grande aptitude à rejeter le bruit de fond optique. Dans les abysses, ce dernier est principalement constitué de photons engendrés par les électrons émis dans la désintégration radioactive du potassium 40, mais aussi par la bioluminescence des organismes marins. Cette dernière composante varie lentement en fonction des conditions environnementales (température, intensité des courants) qui intéressent au premier chef les biologistes. À l'instar d'*Antares*, *KM3NeT* sera un observatoire pluridisciplinaire abritant aussi des sismographes et des capteurs de pression intégrés dans les réseaux nationaux d'alertes aux séismes et aux tsunamis. Des capteurs acoustiques permettront le recensement et la surveillance des déplacements des populations des cétacés. Les capteurs physico-chimiques (O_2, CO_2, température et radioactivité) fourniront des mesures de variations sur de longues périodes reliées au changement climatique global.

Par ailleurs, les télescopes à neutrinos créent des ponts entre l'astronomie et la physique des particules. Ils pourront étudier les neutrinos produits dans l'atmosphère lors des bombardements de rayons cosmiques et apporter des informations sur la hiérarchie des masses des neutrinos, un paramètre fondamental encore inconnu *(voir l'entretien avec Marco Zito, pages 32 et 33)*.



L'EAU PROFONDE de la Méditerranée est le milieu de détection des expériences ANTARES *(à gauche)* et KM3NeT. Celle-ci, en cours d'installation, sera équipée de modules optiques améliorés *(à droite)*.

– Antoine Kouchner
APC, université Paris-Diderot



LA CARTE DES NEUTRINOS de haute énergie établie par *IceCube* répertorie la provenance des particules (qui sont numérotées). On note une accumulation de neutrinos proche du centre galactique. L'intensité de la couleur violette reflète la probabilité qu'une source ponctuelle soit à l'origine du signal. Certains neutrinos, très éloignés du plan galactique, sont originaires d'au-delà de la Voie lactée.

détecteur observe aussi des neutrinos produits localement par les rayons cosmiques, à raison de un toutes les six minutes. Ces neutrinos sont produits par l'interaction de rayons cosmiques avec des noyaux d'hydrogène ou d'oxygène de l'atmosphère terrestre. Mais parce qu'ils sont créés dans notre voisinage, ces neutrinos ne nous apprennent rien sur la nature des rayons cosmiques ou d'autres phénomènes astrophysiques. Nous devons donc filtrer ces importuns pour détecter les neutrinos cosmiques. L'expérience nous a appris à reconnaître les motifs lumineux produits par les neutrinos atmosphériques, et nous savons donc les ignorer.

Ainsi, nous pouvons être certains que les neutrinos dotés d'une énergie de l'ordre du PeV vus par *IceCube* proviennent des profondeurs du cosmos. Ils pourraient provenir des mêmes sources que les rayons cosmiques, comme nous l'avons vu, mais d'autres explications, plus exotiques, sont possibles. Comme le fait que les neutrinos soient liés à la matière noire, cette composante invisible et de nature inconnue qui constituerait plus de 80 % de toute la matière du cosmos. L'idée serait plausible si la matière noire était constituée de particules très lourdes ayant une durée de vie moyenne supérieure à l'âge actuel de l'Univers. Dans un tel scénario, les particules de matière noire pourraient de temps à autre se désintégrer et produire les neutrinos énergétiques que nous observons. Il est donc crucial de traquer la source des neutrinos pour tester les diverses hypothèses.

BIBLIOGRAPHIE

S. Adrián-Martínez *et al.*, **First combined search for neutrino point-sources in the Southern hemisphere with the *Antares* and *IceCube* neutrino telescopes**, soumis à *ApJ*, en ligne, arXiv:1511.02149, 2015

M. G. Aartsen *et al.*, **Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of *IceCube* data**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, n° 10, article n° 101101, 2014

S. Gelmini *et al.*, **Des neutrinos pour mieux voir**, *Pour la Science*, n° 394, août 2010

Avant la découverte des neutrinos dans la gamme du PeV, la recherche de neutrinos cosmiques par *IceCube* s'était presque exclusivement cantonnée à l'une des trois saveurs de neutrinos : les neutrinos muoniques (les deux autres étant les neutrinos électroniques et tauiques). Les physiciens s'attendent à ce que les neutrinos cosmiques soient à peu près également répartis entre les trois saveurs au moment où ils arrivent sur Terre, mais certains sont plus faciles à repérer à cause du signal qu'ils produisent dans notre détecteur.

Nous avions initialement optimisé *IceCube* pour traquer les neutrinos muoniques ; en percutant des atomes, ces particules produisent des traînées lumineuses de 1 kilomètre de long, qui traversent une grande partie du détecteur. Cette technique nous permet en quelque sorte de rendre notre zone de « collecte » des neutrinos plus grande que le volume réel du détecteur, en l'étendant à des neutrinos qui interagissent un peu en dehors du dispositif. Mais elle ouvre aussi la porte à une plus grande contamination de particules autres que les neutrinos cosmiques, et nous devons prendre des mesures supplémentaires pour filtrer ce fond.

Des neutrinos jamais détectés

Nous nous sommes aussi intéressés à une tout autre classe de neutrinos d'énergie extrêmement élevée, les neutrinos dits de Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK), qui se forment lors de l'interaction de rayons cosmiques avec des photons du fond diffus cosmologique, un vestige du Big Bang. De tels neutrinos auraient des énergies dans la plage des exaélectronvolts (1 EeV = 10^{18} eV). Cette seconde étude se recentrait sur une région plus limitée d'*IceCube*, à savoir la partie centrale du détecteur (environ la moitié du volume total), ce qui laissait moins de place à la contamination. Le grand avantage de confiner la recherche de cette manière est que le détecteur peut mesurer l'énergie complète déposée par chaque neutrino dans la glace avec une exactitude de 10 à 15 %, ce qui est nettement mieux que les mesures que nous pouvons faire sur les neutrinos interagissant à l'extérieur du détecteur. Nous pouvons aussi identifier les neutrinos des trois saveurs plutôt que restreindre la recherche à la variété muonique.

Depuis la découverte d'Ernie et de Bert, nous avons appliqué les deux méthodes

de détection des neutrinos muoniques et des neutrinos GZK pour d'autres neutrinos cosmiques. Les données de la première année ont livré 26 neutrinos dont l'énergie était comprise entre 30 et 1 200 TeV, soit un total de 28 avec Ernie et Bert. Ce nombre était assez élevé pour, statistiquement, être confiant à 99,9999 % qu'il ne s'agissait pas de neutrinos atmosphériques, qui auraient été bien moins nombreux. Quand nous avons ensuite ajouté une autre année de données, le total a grimpé à 54 neutrinos, dépassant le seuil statistique communément admis pour valider une « découverte ». Nous avions observé des neutrinos venant de l'espace profond !

dentifier les sources

D'où exactement dans l'Univers ces neutrinos proviennent-ils ? Les événements que nous avons collectés jusqu'à présent ne constituent pas un échantillon assez grand pour nous apporter une réponse concluante. La carte du ciel où sont indiquées les directions d'arrivée *(voir la figure page ci-contre)* montre que ces neutrinos ne viennent pas tous de la Galaxie. En effet, la plupart viennent de directions très éloignées du plan galactique, et sont donc presque certainement d'origine extragalactique.

Il semble néanmoins qu'un nombre important de neutrinos proviennent du centre de la Voie lactée. Bert (numéroté 14 sur la figure), qui reste l'un des neutrinos les plus énergétiques jamais observés, fait partie de ce groupement et provient à moins de un degré du centre galactique. Nous ne sommes pas en mesure de dire avec certitude pourquoi cette région émet tant de neutrinos, mais nous savons que le centre galactique regorge de vestiges de supernovæ et contient en outre un trou noir supermassif – autant de sources possibles de ces neutrinos.

Nous espérons nous faire une meilleure idée de l'origine des neutrinos cosmiques à mesure que nous continuerons de collecter plus de neutrinos muoniques traversant la Terre pour arriver jusqu'à nous. Parce que ces particules produisent des traînées d'un kilomètre de long, leur direction peut être restituée à moins de 0,5 degré près ; il en résultera une carte du ciel plus précise. En comparant ces directions à la position d'objets célestes connus, tels que des galaxies brillantes abritant un noyau actif ou des sites de sursauts gamma, nous serons enfin capables de déterminer certaines des sources de rayons cosmiques.

IceCube commence seulement à gratter la surface des découvertes possibles. L'expérience est construite pour fonctionner vingt ans, peut-être plus. Nous réfléchissons déjà à la suite. D'autres expériences traquent également les neutrinos *(voir l'encadré page 29)* et notre équipe propose de construire un détecteur étendu utilisant environ 10 kilomètres cubes de glace, soit une dizaine de fois le volume d'*IceCube*. Grâce à cette taille augmentée, nous pourrions enfin collecter suffisamment de neutrinos cosmiques pour déterminer avec confiance d'où ils émanent, eux et leurs cousins les rayons cosmiques. ■

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

14 axes de formation

Statistiques, bioinformatique et big data
Génie logiciel, modélisation, robotique
SIG, géographie, archéologie
Energie, environnement
Electronique, optique, métrologie
Matériaux et molécules : mise en oeuvre
Matériaux et molécules : caractérisation
Microscopie
Chromatographie, spectroscopie
Spectrométrie de masse
Résonance magnétique nucléaire
Biologie
Expérimentation animale
Qualité, sécurité

Des formations aux technologies de pointe pour les ingénieurs et les techniciens

Des stages de courte durée (3 à 5 jours), se déroulant dans les laboratoires du cnrs, en effectifs réduits (env. 10 stagiaires)

Une pédagogie basée sur l'expérimentation

La possibilité de stages organisés en intra-entreprise

Découvrez tous nos stages 2016 : cnrsformation.cnrs.fr

te.contact@cnrs.fr

« La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence »

Marco ZITO est physicien à l'Irfu, au centre du CEA à Saclay, et membre de la collaboration T2K.

Découverts à partir de 1956, les neutrinos sont des particules fortement intrigantes, dont les physiciens cherchent à mesurer les propriétés. De ces dernières dépendrait l'évolution de l'Univers.

Entretien avec Marco Zito

Le prix Nobel de physique 2015 a été décerné à Takaaki Kajita et Arthur McDonald pour leur rôle majeur dans [illegible] au Japon, et SNO, au Canada. Ces détecteurs ont contribué à mettre en évidence le phénomène dit d'oscillation des neutrinos. En outre, le Breakthrough prize 2016 a récompensé cinq collaborations de physiciens (*Super-Kamiokande*, K2K/T2K, SNO, *Daya Bay*, *KamLAND*) qui étudient les propriétés de ces oscillations. Marco Zito, physicien au CEA, membre de l'expérience T2K et auteur du livre *Dans le tourbillon des particules* (Belin, 2015), nous explique les enjeux de la recherche sur les neutrinos.

POUR LA SCIENCE
Pouvez-vous nous expliquer les étapes qui ont conduit à introduire le concept d'oscillation des neutrinos ?

MARCO ZITO : L'hypothèse de l'existence des neutrinos a été émise en 1930 par le physicien Wolfgang Pauli. Ces particules n'interagissent que très peu avec la matière et sont donc difficiles à détecter. Il a fallu plus d'une vingtaine d'années pour confirmer leur existence, grâce à une expérience utilisant le cœur d'une centrale nucléaire, aux États-Unis, comme source de neutrinos.

Les physiciens se sont aussi intéressés aux neutrinos produits par le Soleil. Une de ces expériences, *Homestake*, ne détectait qu'un neutrino par jour au lieu de trois prévus par les modèles qui décrivent l'activité du Soleil. Une explication était proposée par le physicien italien Bruno Pontecorvo : l'« oscillation » des neutrinos.

PLS
De quoi s'agit-il ?

M. Z. : Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, associés à trois particules chargées, l'électron, le muon et le tau. Un neutrino peut changer spontanément de saveur au cours du temps : c'est l'« oscillation ». La théorie l'explique en définissant trois états de neutrinos, chacun associé à une masse. Les trois états de saveur et les trois états de masse sont différents, mais ils sont reliés suivant certains principes de la physique quantique. Chaque état de saveur correspond à une certaine combinaison des états de masse.

Or chaque état de masse est décrit par une onde ayant sa propre fréquence. Dès lors, si un neutrino électronique émis par le Soleil, par exemple, vole vers la Terre, sa combinaison varie avec le temps. Les trois états de masse, dont les fréquences diffèrent légèrement, se déphasent, ce qui fait varier la saveur. Pour les autres particules fondamentales, les fréquences sont trop différentes pour permettre le phénomène d'oscillation.

PLS
Quand le phénomène d'oscillation des neutrinos a-t-il été confirmé ?

M. Z. : L'expérience *Homestake* présentait un déficit de neutrinos solaires ; d'autres expériences avaient noté une anomalie dans les neutrinos atmosphériques (des neutrinos produits par la collision de rayons cosmiques, surtout des protons de haute énergie, avec l'atmosphère terrestre). En 1998, l'expérience japonaise *Super-Kamiokande* a montré, grâce à l'analyse menée par Takaaki Kajita, que le déficit en neutrinos atmosphériques venant d'au-dessus du détecteur différait de celui associé aux neutrinos provenant de l'antipode et qui traversaient toute la Terre. C'était un indice de l'oscillation des neutrinos, la différence étant due aux distances inégales parcourues par les neutrinos atmosphériques.

Jusque-là, les expériences étudiant les neutrinos solaires étaient uniquement sensibles aux neutrinos électroniques. L'expérience *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), dirigée par Arthur McDonald, était sensible à toutes les saveurs. En 2001, les physiciens de cette expérience ont montré que le flux de neutrinos solaires était bien celui attendu par la théorie et qu'un tiers des neutrinos avaient une saveur électronique. Le prix Nobel 2015 récompense ces deux expériences.

PLS

Une nouvelle génération d'expériences étudie les oscillations ; qu'ont-elles découvert ?

M. Z. : Pour exprimer le lien entre les états de saveur et les états de masse des neutrinos, les physiciens utilisent une matrice qui dépend des masses et de trois paramètres nommés angles de mélange. L'étude des neutrinos solaires et des neutrinos atmosphériques a permis de mesurer deux des angles. Le troisième a été mesuré à partir de 2011 par l'expérience T2K, au Japon, puis avec grande précision par *Daya Bay*, en Chine.

La matrice contient un dernier paramètre, qui, s'il est non nul, implique des différences dans la façon d'osciller des neutrinos et des antineutrinos. Il faudra peut-être attendre de futures expériences, telles *Hyper-Kamiokande*, au Japon, ou *Dune*, aux États-Unis, pour mesurer ce paramètre.

PLS

Et qu'en est-il de la masse des neutrinos ?

M. Z. : C'est le sujet qui motive particulièrement la communauté des physiciens du domaine. La mesure directe de la masse des neutrinos est très difficile. L'expérience KATRIN, en Allemagne, devrait atteindre une sensibilité de deux dixièmes d'électronvolt, mais les neutrinos sont peut-être plus légers.

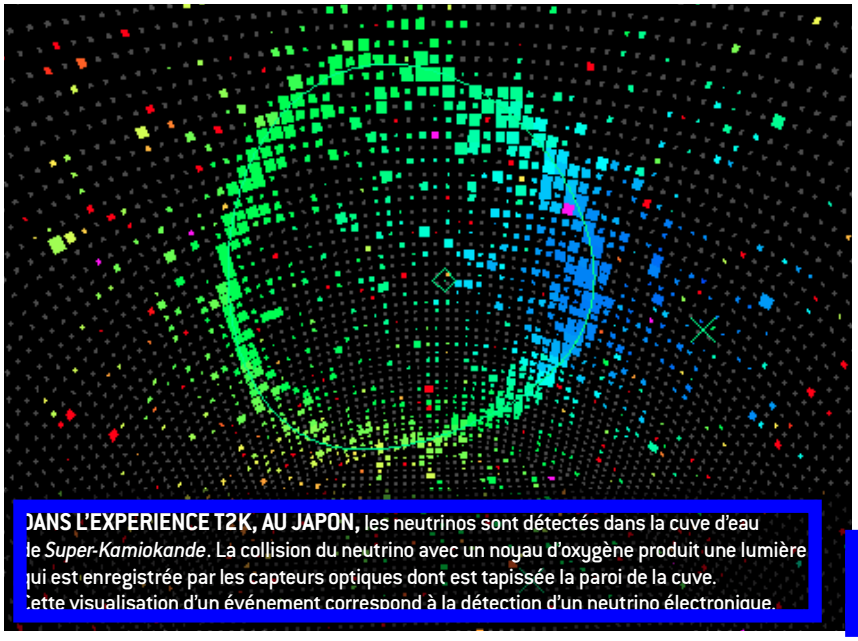
Ce que nous savons le mieux mesurer aujourd'hui, c'est la différence de masse entre deux types de neutrinos. Cependant, sur les trois masses, nous avons un problème de hiérarchie : nous ne savons pas si nous avons deux neutrinos très légers et un légèrement plus lourd, ou un très léger et deux plus lourds. L'expérience NOvA, aux États-Unis, est similaire à T2K si ce n'est que la source et le détecteur sont distants de 800 kilomètres, au lieu de 290 kilomètres pour T2K. Sur une telle distance, les deux hiérarchies possibles se distingueraient par des différences dans les oscillations.

La question de la masse des neutrinos pose aussi des problèmes théoriques qui ouvrent une fenêtre sur la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules. Elle requiert peut-être l'introduction de neutrinos, dits stériles, qui n'interagissent pas du tout avec la matière.

La connaissance des masses des neutrinos est cruciale en cosmologie, car elles pourraient aussi jouer un rôle sur la formation des grandes structures (galaxies et amas de galaxies). Et le neutrino interviendrait aussi dans des scénarios expliquant pourquoi l'Univers est constitué de matière alors qu'il a probablement débuté avec des quantités égales de matière et d'antimatière.

La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence. Les progrès ont été lents, mais ils ont à chaque fois conduit à une découverte. Les années à venir nous promettent encore de belles choses.

Propos recueillis par Sean BAILLY



DANS L'EXPERIENCE T2K, AU JAPON, les neutrinos sont détectés dans la cuve d'eau du *Super-Kamiokande*. La collision du neutrino avec un noyau d'oxygène produit une lumière qui est enregistrée par les capteurs optiques dont est tapissée la paroi de la cuve. Cette visualisation d'un événement correspond à la détection d'un neutrino électronique.

BIBLIOGRAPHIE

M. Zito, **Dans le tourbillon des particules**, Belin, 2015.

M. Hirsch *et al.*, **Les neutrinos, messagers de l'inconnu**, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

T. Lasserre et D. Vignaud, **La mystérieuse identité des neutrinos**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

A. McDonald *et al.*, **L'énigme des neutrinos solaires résolue**, *Pour la Science*, n° 312, octobre 2003.

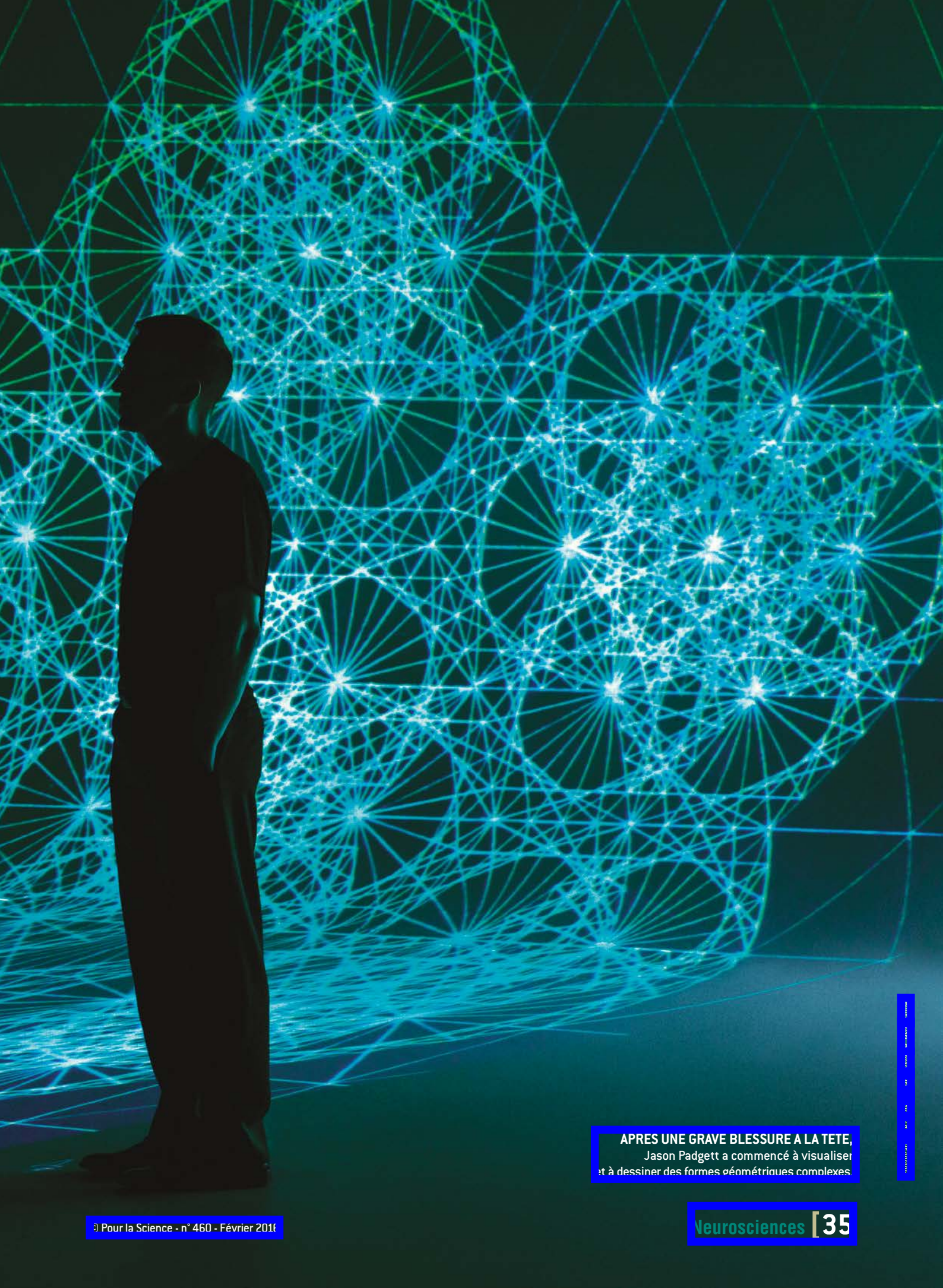
A ECOUTER

Le jeudi 11 février 2016, de 16h à 17h, Marco Zito reviendra sur les enjeux de la recherche sur les neutrinos dans l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. www.franceculture.com

Du GÉNIE par accident

Darold Treffert

Il arrive qu'un traumatisme crânien, un accident vasculaire cérébral ou une maladie neurodégénérative fasse surgir un étonnant don artistique ou intellectuel. Le génie serait-il à la portée de chacun ?



APRES UNE GRAVE BLESSURE A LA TETE, Jason Padgett a commencé à visualiser et à dessiner des formes géométriques complexes.

EN 2002, L'AMERICAIN JASON PADGETT a été victime d'une agression brutale, qui l'a fortement commotionné. Peu de temps après, il a commencé à voir des « images », qu'il transcrivit par la suite en dessins, tels ceux représentés ici. Il apprit que les motifs répétés qu'il dessinait étaient des fractales. Il fait à présent des études de mathématiques pour comprendre ces figures, et il a écrit un livre populaire sur ses expériences (*Struck by Genius : How a Brain Injury Made Me a Mathematical Marvel*, avec Maureen Ann Seaberg, 2014).

Nous avons du mal à croire vraies certaines histoires tant elles paraissent... incroyables. Voyez celles-ci. Orlando Serrell, un garçon de 10 ans, assommé un jour par une balle de baseball, découvre qu'il peut se rappeler les moindres événements vécus depuis lors. Une femme âgée, qui n'a jamais peint de sa vie, devient une artiste prodigieuse dès qu'elle commence à souffrir d'une démence évolutive. Un chirurgien orthopédiste frappé par la foudre se met à composer ses propres sonates et partage son temps entre concerts et médecine. La liste n'est pas close...

Ces personnes sont toutes « atteintes » du syndrome du savant acquis. Dans le « savantisme » (ou syndrome du savant), condition rendue célèbre par le film *Rain Man* en 1988, des individus ont dès leur plus jeune âge des talents extraordinaires, mais spécifiques : musicaux, artistiques, mathématiques, mnémoniques ou manuels. Ces dons contrastent avec leurs déficiences marquées pour le langage et les interactions sociales, entre autres. Dans *Rain Man*, par exemple, le personnage qu'incarne Dustin Hoffman, Raymond Babbitt – inspiré de Laurence Kim Peek (1951-2009) –, est un calculateur prodige doué d'une mémoire phénoménale, tandis que ses capacités cognitives et comportementales sont limitées en raison de son autisme : il ne sait pas nouer la moindre relation sociale, possède un maigre vocabulaire et se trouve incapable de résoudre des problèmes concrets très simples.

En revanche, dans le syndrome du savant acquis, c'est à la suite d'une soudaine atteinte cérébrale, un traumatisme à la tête par exemple, que des aptitudes artistiques ou intellectuelles qui touchent au génie se révèlent. Un « savant méconnu » sommeille-t-il en chacun de nous ? Si tel est le cas, pourrait-on trouver un moyen d'exploiter ces capacités enfouies sans souffrir de maladie ou d'une blessure cérébrale ?

L'ESSENTIEL

- Certaines personnes ayant subi une lésion du cerveau, dans sa partie gauche notamment, acquièrent des dons intellectuels très précis.
- Cette forme très rare de syndrome du savant est acquise, au contraire de celle que présentent certaines personnes dès leur plus jeune âge.
- Selon une hypothèse, l'atteinte d'une région du cerveau gauche libérerait les fonctions créatives ou intellectuelles liées au cerveau droit, ou provoquerait une réorganisation cérébrale qui réveillerait des capacités dormantes.

Sculpteur ou mécanicien... mais surdoué

J'ai étudié le syndrome du savant durant une grande partie de ma carrière de psychiatre. Jusqu'au milieu des années 1980, je supposais qu'il s'agissait d'un état congénital. Un jour, après avoir visité la première exposition des sculptures exceptionnelles réalisées par Alonzo Clemons, en 1986, j'ai changé d'avis. Quand il était bébé, il paraissait apprendre vite. Mais vers l'âge de 3 ans, Alonzo Clemons fit une chute qui provoqua une lésion cérébrale. Son développement intellectuel ralentit subitement

en le laissant avec une grave déficience du angage. Cependant, il devint ensuite un sculpteur spectaculaire de divers matériaux, compris de la matière grasse culinaire. Il se révéla doué d'un étonnant talent pour représenter les animaux. Partant d'une photographie d'un cheval, il en sculptait avec ses seuls doigts une réplique en trois dimensions en moins d'une demi-heure, reproduisant chaque muscle, chaque tendon dans les moindres détails.

Cherchant alors des publications sur le savantisme acquis dans la littérature médicale, je n'en ai trouvé que quelques exemples. En particulier, en 1923, la psychologue américaine Blanche Minogue avait décrit l'apparition de capacités musicales extraordinaires chez un enfant de 3 ans après un accès de méningite. Et en 1980, Terry Brink, un psychologue de l'École de Palo Alto, rapporta qu'un garçon de 9 ans était devenu soudainement un as de la mécanique à la suite d'un coup de feu qui avait lésé l'hémisphère gauche de son cerveau. Il pouvait par exemple démonter, réassembler et modifier des bicyclettes et avait inventé un *punching ball* reproduisant les tangages et les esquives d'un véritable boxeur.

Ces publications éparses reflétaient la rareté de ces états : une commotion ou un coup à la tête n'augmente généralement pas les capacités cognitives ou créatives. Je décidai alors de collecter les descriptions de savantisme dans le monde. En 2010, j'avais constitué un registre mondial de 319 cas connus (dont 5 en France). Seulement 32 (soit 10 %) correspondaient à la forme acquise à la suite d'un choc à la tête ou d'une maladie cérébrale.

Créativité due à une maladie dégénérative

Parmi les travaux versés à mon registre figuraient ceux de l'équipe du neurologue Bruce Miller, actuellement chercheur à l'université de Californie à San Francisco. Depuis 1996, Bruce Miller avait enregistré 12 cas d'un trouble nommé démence frontotemporale (DFT). Les patients, tous âgés, présentaient des talents musicaux et artistiques, parfois prodigieux, pour la première fois de leur vie. La DFT diffère de la maladie d'Alzheimer, car le processus dégénératif n'affecte que les lobes frontaux du cerveau

L'AUTEUR

Darold A. TREFFERT est psychiatre dans le Wisconsin, aux États-Unis. Il a été consultant pour le tournage du film *Rain Man* en 1988

SUR LE WEB

Site « Savant Syndrome » de la Wisconsin Medical Society : www.savantsyndrome.com

Œuvres de Jason Padjett : http://fineartamerica.com/profiles/jason-padgett.html

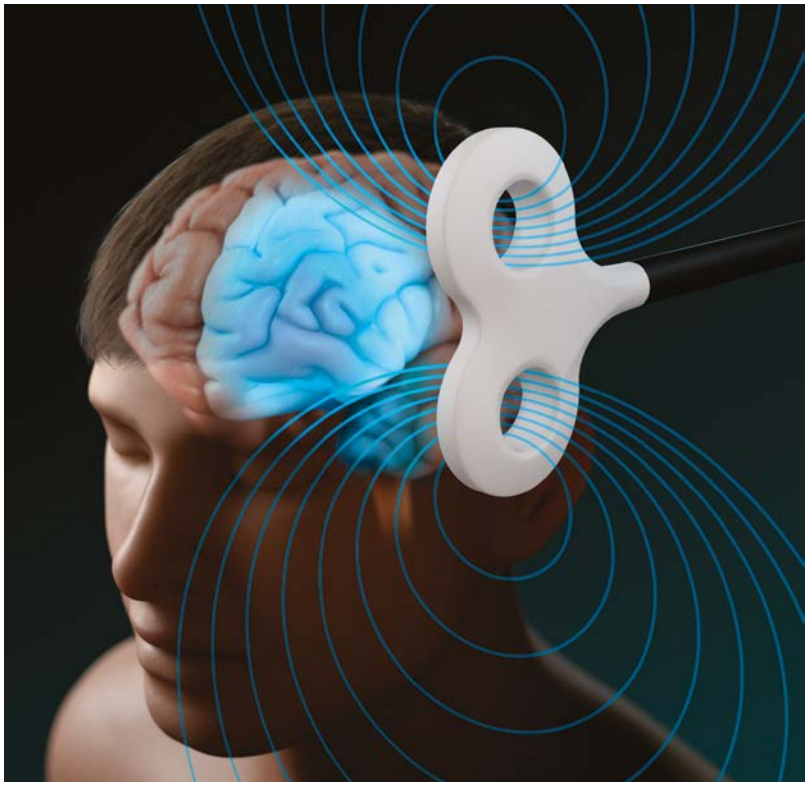
Site d'Alonzo Clemens : http://alonzoclemons.com/

Site consacré à Tommy McHugh : www.tommumchugh.co.uk/

Site d'Orlando Serrell : www.orlandoserrell.com/

ACQUERIR UN DON INSTANTANEMENT

Une technique nommée stimulation magnétique transcrânienne répétitive permet de débloquer temporairement des capacités intellectuelles. Elle offre un moyen de comprendre comment ces capacités apparaissent. Lorsqu'une bobine électrique placée sur la tempe gauche produit un champ magnétique pulsé à travers le crâne, ce champ semble éteindre des circuits cérébraux dans la région temporale gauche, siège du traitement des mots et d'autres informations. Cela ressemble à ce qui se passe lors d'un traumatisme sur la gauche de la tête. Les circuits de l'hémisphère droit dédiés aux tâches spatiales jouent alors un rôle plus intense dans les processus de traitement mental. Ainsi, une personne incapable de dessiner des personnages autrement que par des traits en bâtons peut devenir capable de faire un portrait reconnaissable d'un ami ou d'un parent.



Soudainement, un don est né

Après un accident ou une maladie cérébrale, certaines personnes deviennent poètes, musiciens ou calculateurs prodiges sans avoir jamais exercé ces activités auparavant. Voici quelques cas de ce syndrome du savant acquis.

Poète et peintre Tommy McHugh (1949-2012) était entrepreneur à Liverpool, en Angleterre, sans intérêt particulier pour la poésie ou la peinture. À l'âge de 51 ans, une hémorragie cérébrale endommagea l'aire frontale de son cerveau. Quelque temps après, il se mit soudain à remplir des carnets de poèmes et à passer une grande partie de son temps à peindre et à sculpter. Les médecins attribuèrent ce nouveau talent à une « désinhibition relative », qui libère la capacité de juxtaposer de façon inhabituelle des mots ou des images. McHugh a exposé au Royaume-Uni et son histoire a fait l'objet de plusieurs documentaires télévisés.

Hyperthymestique En 1979, à l'âge de 10 ans, en Virginie, Orlando Serrell se mit à faire des calculs de dates de calendrier – ou calculs calendaires – après avoir été atteint sur la gauche de la tête par une balle de baseball. Depuis, il peut trouver le jour de la semaine correspondant à n'importe quelle date, que ce soit le 4 janvier 1960 ou le 28 septembre 2012. Il se souvient du temps qu'il a fait chaque jour depuis son accident. Ses capacités mnésiques ont progressé au point qu'il peut se souvenir des détails les plus infimes de ses activités quotidiennes, un état appelé syndrome hyperthymestique (du grec *thymesis*, se souvenir). Des IRM fonctionnelles réalisées en 2002 au centre médical de l'université de Columbia ont confirmé qu'il procède à des calculs inconscients et que son talent ne repose pas sur la mémorisation du calendrier.

Compositeur et pianiste Agé de 40 ans, Derek Amato était formateur en entreprise dans le Colorado, sans aptitude ni intérêt particulier pour la musique. En 2006, il plongea malencontreusement du côté peu profond d'une piscine et subit une forte commotion ainsi qu'une perte auditive partielle d'une oreille. Sorti de l'hôpital, il s'est vu inexplicablement attiré par le piano, instrument qu'il n'avait jamais touché auparavant. Il voyait des points noirs et blancs qu'il était capable de transposer en notes sur le piano pour jouer instinctivement des morceaux de musique. Il gagne désormais sa vie en tant que compositeur et pianiste.

Du rock au classique En 1994, Tony Cicoria, un chirurgien orthopédique de New York, téléphonait dans une cabine lorsqu'il fut frappé par la foudre. Une infirmière qui faisait la queue le présuma en arrêt cardiaque et le réanima. Il eut de légers problèmes de mémoire qui s'estompèrent au bout de deux semaines. Il reprit son activité de chirurgien orthopédique à plein temps. Quelque chose avait toutefois changé. Avant l'accident, il se considérait plutôt comme un adepte de musique rock. Or voilà qu'une obsession pour le classique le dévorait. Il entendait toujours le même air de musique dans sa tête. Il décida finalement de transcrire cet air parasite en une pièce pour piano de 26 pages, qu'il intitula « Fantasia : la sonate de la foudre, opus 1 » (et que l'on peut écouter sur Internet).

et ne s'étend pas à d'autres régions. Elle touche en général l'aire temporale antérieure gauche et le cortex orbitofrontal. Ces deux zones inhibent normalement l'activité du système visuel, situé à l'arrière du cerveau. La maladie semble libérer une nouvelle sensibilité artistique en supprimant des signaux inhibiteurs provenant de l'avant du cerveau. Seul inconvénient : les lésions des lobes frontaux peuvent induire des comportements inconvenants, qui caractérisent la DFT. « La DFT est une fenêtre inattendue sur le processus artistique », affirme Bruce Miller.

D'autres travaux confirment que le génie accidentel résulte d'une diminution de l'activité nerveuse dans certaines aires cérébrales, combinée à une suractivité compensatoire dans d'autres régions. Plus précisément, il provient d'un ensemble d'événements, que je surnomme les « trois R », survenant après une lésion cérébrale, le plus souvent à la suite d'un choc au niveau de l'hémisphère gauche. Le processus commence par le *recrutement*, une augmentation de l'activité électrique dans le cortex cérébral encore intact, souvent dans l'hémisphère droit. Les circuits cérébraux sont ensuite *recâblés* pour connecter des régions qui ne l'étaient pas auparavant. Enfin, on assiste au *réveil* d'une capacité dormante, qui résulte d'un meilleur fonctionnement des régions cérébrales nouvellement connectées.

Stimulation électrique du cerveau pour résoudre une énigme

En 2012, afin de prouver que des modifications cérébrales peuvent expliquer des compétences nouvellement acquises, Richard Chi et Allan Snyder, de l'université de Sydney, ont monté une expérience originale. Ils ont demandé à 33 volontaires de résoudre l'énigme dite des neuf points. Il s'agit de relier neuf points répartis sur trois lignes en traçant quatre traits, mais sans lever le crayon ni repasser sur les tracés précédents. L'épreuve était soumise avant et après réception par les participants d'une « stimulation transcrânienne à courant direct » (tDCS, pour *transcranial direct-current stimulation*), une technique non invasive dépourvue d'effets indésirables. Un courant électrique polarisé diminuait l'activité nerveuse dans une partie de l'hémisphère gauche traitant les

signaux sensoriels, la mémoire, le langage et d'autres processus cérébraux, tout en augmentant l'activité dans le lobe temporal antérieur droit.

Aucun participant n'a pu résoudre l'énigme avant stimulation, ni aucun des 29 sujets ayant été exposés à une stimulation simulée, sorte de placebo. Or 40 % des participants (14 sur 33) ont réussi à résoudre le problème après avoir été stimulés par tDCS. Comment une personne peut-elle subitement améliorer ses performances cognitives sous l'effet d'une simple stimulation électrique du cerveau ? Parce que ces savants « instantanés » – tout comme les « savants » congénitaux ou devenus tels après un accident – « savent des choses » de façon innée, sans les avoir jamais apprises. Ainsi, Alonzo Clemons, le sculpteur, n'avait jamais suivi de formation artistique, mais il savait instinctivement sculpter un cheval en mouvement.

L'hypothèse que ces réservoirs de capacités et de connaissances soient hérités d'une façon ou d'une autre constituerait une explication plausible. Nous ne commencerions pas notre vie avec une « ardoise » vide sur laquelle s'inscriraient ensuite les enseignements de notre éducation et des autres expériences de la vie. Plus vraisemblablement, le cerveau serait dès le début doté d'un ensemble de prédispositions aptes à traiter ce qu'il voit ainsi que les « règles » de la musique, de l'art ou des mathématiques. Les savants puiseraient dans ce savoir hérité beaucoup plus efficacement que le sujet moyen.

Comment devenir un génie ?

Le fait que ces talents puissent émerger plus tard dans la vie soulève une question passionnante : chacun de nous a-t-il la capacité de devenir un savant sans avoir à subir les affres d'une lésion cérébrale ou d'une démence ? Comment libérer nos aptitudes innées, mais cachées ?

Le moyen le plus évident serait d'utiliser la stimulation tDCS, ou une technique voisine qui s'effectue de façon répétitive. Cette sorte de « bonnet à penser » servirait d'interrupteur sur différentes régions cérébrales pour augmenter la capacité créative. La solution technique pourrait cependant ne pas être une condition préalable obligatoire. On sait que la méditation ou la pratique assidue d'une activité artistique peut accroître l'activité de notre cerveau droit, plus créatif, permettant d'explorer des aptitudes artistiques cachées.

À mesure que les chercheurs exploreront le cerveau, ils pourraient mieux comprendre ce qui se passe lorsque les circuits cérébraux « s'allument » ou « s'éteignent ». De nouvelles techniques d'imagerie du cerveau pourraient se révéler utiles. Aujourd'hui, l'IRM (imagerie par résonance magnétique) de diffusion et la tractographie par IRM de diffusion permettent déjà de cartographier *in vivo*, en trois dimensions, le trajet des fibres nerveuses et leurs connexions, révélant la complexité des circuits dans le cerveau humain. Qui sait, ces techniques permettront peut-être aux chercheurs d'établir des corrélations entre l'activité cérébrale et l'apparition d'aptitudes nouvelles...

Il est évidemment très difficile d'observer le cerveau d'un individu pendant qu'il effectue une tâche créative. Essayez seulement de jouer du piano ou de sculpter dans une machine à IRM ! D'autant que tout mouvement compromet la précision de l'image. Une technique plus récente, la spectroscopie proche infrarouge ou oxymétrie cérébrale (ou NIRS, pour *near-infrared spectroscopy*), pourrait éviter ces problèmes. Elle mesure la quantité d'oxygène dans les vaisseaux sanguins qui irriguent le cerveau et retraite les informations sous forme d'images. Encore plus prometteur, un casque récemment développé utilise la technique de tomographie par émission de positrons (TEP) pour suivre l'activité cérébrale d'une personne assise, debout ou en train de faire de l'exercice.

Ces études valent la peine d'être poursuivies. Le syndrome du savant acquis apporte des arguments solides suggérant que nous avons tous un potentiel cérébral inutilisé. La gageure consiste maintenant à trouver les meilleurs moyens d'exploiter nos capacités savantes intérieures – ce petit quelque chose qu'avait Rain Man – tout en conservant intact le reste de nos facultés mentales. ■

Le syndrome du savant acquis

suggère que nous avons tous un potentiel cérébral inutilisé

BIBLIOGRAPHIE

D. A. Treffert et D. L. Rebedew, **The savant syndrome registry : A preliminary report**, *Wisconsin Medical Journal*, vol. 114(4), pp. 158-162, 2015 (http://bit.ly/1Jh07vn).

J. Padgett et M. Seaberg, **Struck by Genius : How a Brain Injury Made Me a Mathematical Marvel**, Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

R. P. Chi et A. W. Snyder, **Brain stimulation enables the solution of an inherently difficult problem**, *Neurosci. Lett.*, vol. 515(2), pp. 121-124, 2012.

D. A. Treffert, **Islands of Genius : The Bountiful Mind of the Autistic, Acquired, and Sudden Savant**, Jessica Kingsley Publishers, 2010.

Le tapirage

l'art de personnaliser son oiseau

Serge Berthier

Plumez un perroquet vert vivant, enduisez-le d'une substance particulière... Après la repousse, vous obtenez un oiseau au plumage jaune-rouge. Telle est la recette du tapirage, une pratique amazonienne qui risque de disparaître – avec ses secrets.

L'homme ne s'est sans doute jamais autant tourné vers la nature pour y puiser son inspiration scientifique ou technique qu'aujourd'hui, où elle est en grand danger. On peut exploiter directement ses inventions, comme ces molécules, souvent d'origine végétale, qui interviennent dans nos médicaments. On peut aussi s'en inspirer pour développer de nouveaux systèmes, de nouveaux matériaux. Les nanostructures que l'on trouve chez les insectes constituent ainsi une importante source d'idées en photonique, avec des applications directes en optique.

Ces découvertes bio-inspirées, dont certaines, tel le Velcro, sont à l'origine de colossales réussites industrielles, ne doivent pas faire oublier ces peuples qui, dans les endroits les plus sauvages et les plus reculés de la planète, vivent de et dans la nature, et ont développé des techniques que nous sommes encore loin de comprendre ou tout simplement de reproduire. Le tapirage en est une.

Mot d'origine incertaine, peut-être dérivé du créole « tapi » signifiant rouge, « tapirage » recouvre l'ensemble des processus permettant de modifier les couleurs des plumes d'oiseaux vivants, et ce de manière définitive. Autrefois répandu dans l'ensemble du bassin amazonien, le tapirage a régressé en proportion de la population amérindienne et ne semble plus guère pratiqué que par quelques peuples isolés, eux-mêmes en grand danger de disparition, dont les Enawenê-Nawê du Mato Grosso, au Brésil.

L'ESSENTIEL

- Le tapirage consiste à arracher les plumes d'un oiseau vivant, puis à l'enduire d'une mixture grâce à laquelle les plumes repoussent avec d'autres coloris.
- Cette pratique amazonienne permettait de personnaliser un oiseau, puis de confectionner des parures inhabituelles.
- Des études structurales dévoilent les effets du tapirage sur la microstructure des plumes et leurs pigments.
- Les mécanismes à l'origine de ces effets restent inconnus.

LES PLUMES JAUNE ET ROUGE de cette parure corporelle conservée au musée du quai Branly, à Paris, sont des plumes tapirées (elles seraient vertes sur l'oiseau non tapiré). Cette coiffe date des années 1960-1970 et provient de l'ethnie Enawenê-Nawê, au Brésil.

Toutes les civilisations américaines préeuropéennes ont développé des techniques artistiques très élaborées autour de l'oiseau et de ses plumes. Elles ont produit des parures chargées d'une symbolique sociale et mystique qui a fait l'objet de nombreuses études. Les plumes tapirées y tiennent une place particulière en raison de leur rareté et de leur grande valeur ajoutée. Plusieurs centaines de ces œuvres plumaires peuvent être admirées dans les plus grands musées, notamment celui du quai Branly, à Paris.

Pourquoi les artistes modifiaient-ils la couleur de certaines plumes d'un oiseau pour leur donner celles d'autres plumes communes par ailleurs ? En fait, l'objectif premier du tapirage était la décoration, donc la personnalisation, d'oiseaux vivants. L'oiseau tapiré devenait unique, reconnaissable donc susceptible d'appropriation. L'utilisation des plumes tapirées dans des parures n'apparaît alors que comme la continuité d'une œuvre antérieure.

Un art plumaire entouré d'un halo de mystère

Le tapirage reste un art entouré d'un halo de mystère. Certains doutent encore, à tort, de sa réalité. Sa pratique, les mécanismes physicochimiques en jeu et leurs conséquences, en particulier la pérennité de l'effet coloré au cours des mues successives de l'oiseau, sont mal connus et incompris. Et les quelques rares tentatives récentes de tapirage contrôlé en laboratoire n'ont pas permis de répondre aux questions posées.

Cet article n'y répondra pas non plus, mais, plus modestement, décrira les effets du tapirage sur les plumes, à défaut d'en expliquer la genèse et les principes fondamentaux. Il s'agit des résultats d'une étude structurale que j'ai réalisée récemment et qui a été présentée lors du colloque « Étudier, préserver et présenter les plumes » organisé en 2014 par le musée du quai Branly.

Les deux plumes qui ont servi à cette étude ont été prélevées l'une sur une coiffe provenant du cabinet de curiosité du marquis de Fayolle à Versailles (probablement originaire de Guyane et datant du XVIII[e] siècle), la seconde sur une parure Enawenê-Nawê de notre époque, ces deux œuvres étant conservées au musée du quai Branly.

L'AUTEUR

Serge BERTHIER est professeur de physique à l'université Paris-Diderot et chercheur à l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS-université Pierre-et-Marie-Curie).

Couleurs pigmentaires ou structurales

Un objet paraît coloré si, lors de son interaction avec la lumière incidente, il renvoie un nombre restreint de longueurs d'onde du spectre visible. Deux types de processus peuvent être à l'œuvre :
1) L'objet peut absorber certaines longueurs d'onde en raison de la présence de pigments. Il en résulte des couleurs dites pigmentaires ou chimiques.
2) Il peut aussi disperser spatialement les longueurs d'onde par divers effets optiques (interférence, diffraction, diffusion). Les couleurs, dites alors structurales ou physiques, sont dues non plus à la nature du matériau, mais à sa microarchitecture. C'est notamment le cas pour les plumes de colibri *(ci-dessous)*.

Que sait-on sur le tapirage ? Bien peu de choses en réalité. On en retrouve cependant de nombreuses mentions dans les récits des explorateurs. Le grand naturaliste et explorateur portugais Soares de Souza en donne une première description en 1587. Tous les voyageurs scientifiques des XVIII[e] et XIX[e] siècles qui parcourent l'Amazonie en font mention, comme Alexander von Humboldt et Aimé Bonpland, ce qui permet de cerner les étapes du processus.

Le premier à l'évoquer, et non des moindres, est le Britannique Alfred Wallace, codécouvreur du principe de la sélection naturelle. Dans son livre *A narrative of travels in the Amazon and Rio Negro*, publié en 1853, Wallace décrit un ornement de tête en plumes issues du « grand macao rouge » (*Ara macao*), mais, dit-il, « ces plumes ne sont pas celles que l'oiseau possède naturellement, car ces Indiens pratiquent l'art curieux de modifier la couleur de nombreux oiseaux. Ils plument ceux qu'ils souhaitent décorer et inoculent dans la blessure la sécrétion laiteuse de la peau d'une petite grenouille ou d'un crapaud. Lorsque les plumes repoussent, elles apparaissent d'un jaune-orange éclatant sans plus de traces du bleu ou vert initial. Et si l'on retire à nouveau ces plumes, les nouvelles repousseront toujours avec cette même couleur, sans avoir besoin de recommencer l'opération ». C'est la première mention de la pérennité de l'effet, mais il est clair que Wallace ne l'a pas observé lui-même.

La seconde mention digne de foi est celle de l'anthropologue d'origine suisse Alfred Métraux dans son ouvrage *La civilisation matérielle des tribus Tupi-Guarani* (1928) : « Les Tupinamba savaient modifier la couleur naturelle des plumes des oiseaux vivants ; ils plumaient une certaine espèce de perroquets verts et enduisaient leur corps "de sang de crapaud". Les nouvelles plumes qui poussaient prenaient une teinte rouge ou jaune. »

On peut par ailleurs se représenter la beauté et la perfection des œuvres vivantes réalisées grâce à quelques gravures de perruches et perroquets amazones tapirés réalisées au début du XIX[e] siècle *(voir les illustrations page ci-contre, en haut)*.

La couleur est un vecteur de communication particulièrement important chez les oiseaux. Depuis l'apparition des premiers oiseaux il y a 160 millions d'années, tous les moyens de production de couleurs et d'effets colorés ont été

LA PRATIQUE DU TAPIRAGE était répandue dans le bassin amazonien, comme l'indique la carte ci-dessus établie par l'anthropologue d'origine suisse Alfred Métraux en 1928. Quelques gravures anciennes montrent les résultats obtenus sur les oiseaux, comme celles ci-dessus, réalisées par Jacques Barraband et tirées de l'ouvrage *L'Histoire naturelle des perroquets*, de François Le Vaillant (1801)

utilisés par les diverses espèces de ce groupe d'animaux : pigments, structures, combinaisons pigments-structure *(voir les encadrés ci-contre)*.

Sans entrer dans le détail des pigments des oiseaux, retenons que nous pouvons en distinguer deux grandes catégories. On a d'une part des pigments exogènes, tels les caroténoïdes que les oiseaux se procurent par la nourriture. L'exemple le plus célèbre est la coloration rouge-rose des flamants roses *(Phoenicopterus roseus)* due à une algue, consommée par des crevettes, elles-mêmes mangées par les flamants. On a d'autre part des pigments endogènes, telles les mélanines synthétisées par l'organisme lui-même et qui donnent les couleurs brunes à jaunes, selon leur forme et concentration, ou encore les psittacines, un caroténoïde spécifique des aras et perroquets. Les pigments, et les mélanines en particulier, se trouvent souvent sous forme de microgranules : les mélanosomes stockés dans les barbes *(voir la figure pages 44-45)*.

L'autre grand processus de coloration, que la nature utilise très largement, est la structuration de la matière. Cette dernière n'intervient alors non plus tant par sa nature chimique que par sa structure géométrique. Dans le modèle ondulatoire, la lumière est une entité périodique qui évolue dans l'espace avec une longueur d'onde λ. Lorsqu'une telle onde entre en contact avec un objet présentant une périodicité du même ordre de grandeur que λ, l'interaction est relativement forte. De même

Diffraction et diffusion

Diffraction et diffusion sont des termes ambigus dont la signification varie d'une situation à l'autre et d'une langue à l'autre. Lorsqu'une [illegible] son cheminement est perturbé. Elle repart dans des directions différentes de la direction initiale : on dit que l'onde est diffractée.

Cette définition est universelle ; c'est après, et lorsqu'il y a plusieurs objets, que les choses se gâtent. Chacun des « objets » d'une structure (interfaces, inclusions, trous, fentes, etc.) diffracte l'onde lumineuse incidente. Un point quelconque de l'espace reçoit donc des ondes provenant de ces différentes sources. Selon la position de ce point, les distances parcourues par les diverses ondes diffèrent, et l'intensité lumineuse en ce point dépend alors des déphasages entre les ondes.

Si la structure diffractante est régulière, périodique, l'espace présente des régions bien déterminées où toutes les ondes sont en phase (intensité maximale) et d'autres où elles sont en opposition de phase (intensité minimale). On parle en général de diffraction lorsque la structure périodique est uni- ou bidimensionnelle (par exemple un réseau de fentes parallèles), et de diffraction cristalline lorsqu'elle est tridimensionnelle (par exemple un cristal de roche avec des rayons X, ou un cristal photonique avec de la lumière visible). Le phénomène dépend beaucoup de la position de l'observateur. Telles ondes qui s'additionnent en un point donné s'annuleront au point voisin. L'origine des phénomènes d'iridescence est là.

Lorsque, au contraire, les objets diffractants sont aléatoirement disposés, il n'y a plus aucune relation de phase entre les ondes. On parle alors de diffusion. Le phénomène reste très sensible à la longueur d'onde (les longueurs d'onde voisines de la taille des objets diffractants seront plus diffusées que les autres), mais pratiquement pas à la position de l'observateur : la diffusion ne donne pas de couleurs iridescentes.

Diffraction de la lumière par un disque numérique

Ciel et nuages : du bleu et du blanc dus à la diffusion

qu'une onde acoustique fait vibrer certains objets plutôt que d'autres lorsque leurs dimensions se correspondent, la matière structurée périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde de la lumière jouera avec elle de façon privilégiée. C'est le domaine de la photonique. Un tel objet, nommé cristal photonique, sélectionne des longueurs d'onde bien particulières, les réfléchit dans des directions déterminées qui dépendent de cette longueur d'onde, créant ainsi les effets d'iridescence.

Chez les oiseaux, les structures photoniques sont très variées. Selon les ordres, on les trouve dans les barbes – c'est le cas en particulier des Psittacidés (aras, perroquets, perruches…) qui nous intéresse ici – ou dans les barbules, comme chez les colibris, pigeons, paons… En particulier, ces derniers et les colibris présentent une architecture très ordonnée à plusieurs échelles, ce qui leur confère des couleurs vives et fortement iridescentes *(voir la figure page 42)*.

Chez les psittacidés, les structures associées aux couleurs des barbes sont plus complexes, moins ordonnées, que les structures responsables de la couleur chez les colibris par exemple, et les pigments y jouent un rôle important. Les couleurs produites peuvent être très vives, mais sont généralement peu iridescentes.

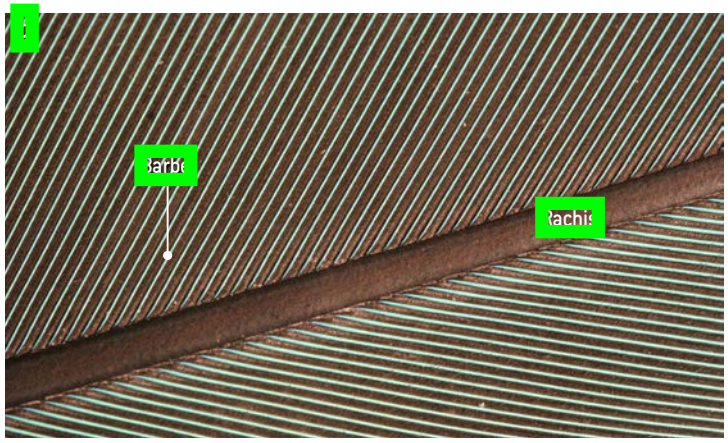
Le cœur de la barbe est composé de cellules géantes creuses qui contiennent des microgranules de pigments, les mélanosomes. De quelques centaines de nanomètres de diamètre, ces granules, en plus de créer des couleurs pigmentaires, créent aussi des couleurs physiques par diffusion voire par diffraction s'ils s'ordonnent régulièrement, ce qui n'est pas le cas chez les psittacidés). La barbe présente des structures photoniques différentes sur son côté dorsal et son côté ventral. Du côté dorsal, la structure est spongieuse et plus ou moins bien ordonnée ; elle est à l'origine des teintes bleues des plumes ainsi que du vert, par combinaison avec un jaune pigmentaire. Du côté ventral, on a une structure multicouche très désordonnée, qui crée peu d'effets optiques.

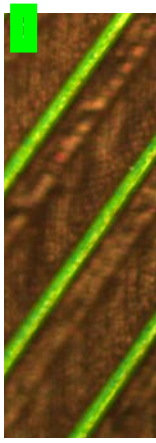
Des mixtures aux ingrédients divers

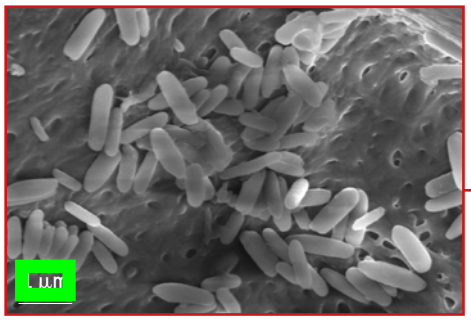
C'est sur le vert dit métamère, produit par combinaison structure-pigment, que repose le principe du tapirage. En modifiant l'une ou l'autre composante, ou les deux, on modifie la couleur résultante. Comment procèdent les Amérindiens ? La démarche est simple et plus ou moins identique chez les divers acteurs. Seule la composition de la mixture varie. L'oiseau, toujours de la famille des psittacidés, est plumé sur une large zone, ou ponctuellement comme on peut le voir sur les gravures anciennes. La peau est alors frottée avec un mélange d'extraits animaux et végétaux, ou ce mélange est introduit directement dans les cavités de la peau laissées par les plumes arrachées.

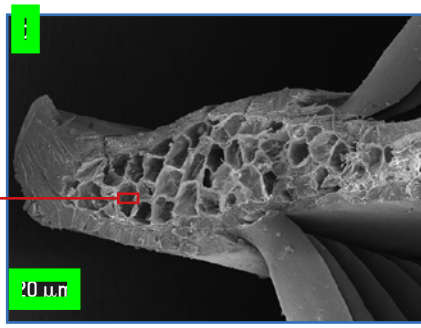
A la base de cette décoction, on retrouve systématiquement un extrait de graines de roucou broyées *(Bixa orellana)*. Très riche en caroténoïdes, la graisse qui entoure les graines est principalement utilisée comme colorant corporel par les Amérindiens. Elle semble présenter une certaine toxicité, mais on lui prête des vertus médicinales. Les composants animaux sont beaucoup plus variés et dépendent des populations, de leur situation géographique et de la faune locale. Le plus répandu est la sécrétion de la peau de *Dendrobates tinctorium* ou « grenouille à tapirer », amphibien de la famille des Dendrobatidés, dont certaines espèces extrêmement toxiques sont utilisées par les Amérindiens pour empoisonner les flèches des sarbacanes.

Les autres composants dont on a observé l'utilisation sont moins répandus. Il s'agit principalement de la graisse du grand poisson-chat Pirarâra *(Phractocephalus hemioliopterus)*, du caïman *Caiman crocodilus*, des œufs ou du sang des tortues *Podocnemis*









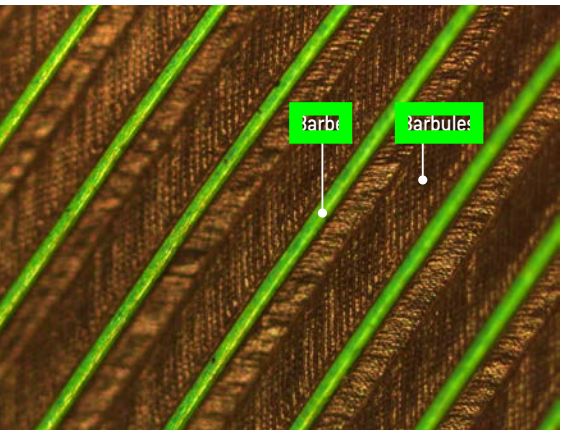
ou même de la graisse cutanée du très rare dauphin d'eau douce, le dauphin rose *Inia geoffrensis*. Difficile de trouver un point commun entre ces différents ingrédients ! À part le dendrobate, les autres animaux ne présentent pas de toxicité particulière. Les Amérindiens ne consomment pas les pirarâras, mais c'est plus en raison de la couleur noire de leur chair que d'un possible empoisonnement. Les constituants chimiques de ces extraits animaux n'ont pas été spécifiquement étudiés. Toutefois, en particulier pour les toxines des dendrobates, il est tout à fait envisageable qu'ils affectent les processus de formation des pigments ou des structures plumaires. Il est plus difficile d'expliquer la pérennité de l'effet au cours des mues successives, propriété qui suppose un mécanisme de nature génétique.

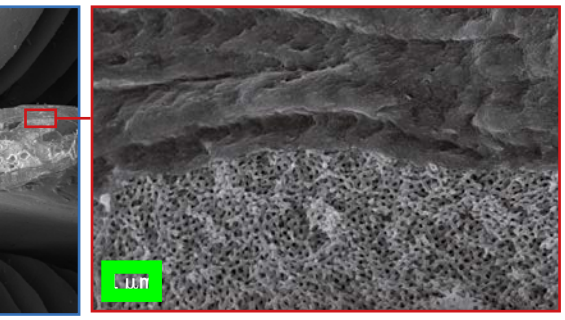
LES MIXTURES UTILISEES pour le tapirage comportent systématiquement des extraits de graines de roucou *(a)* broyées. L'ingrédient d'origine animale le plus répandu est la sécrétion de la peau de *Dendrobates tinctorium (b)*, membre d'une famille de grenouilles aux sécrétions plus ou moins toxiques selon les espèces.

Voyons maintenant ce que sont ces effets. Les plumes tapirées fournies par le musée du quai Branly sont des rémiges secondaires d'une espèce de perroquet du genre *Amazona*, difficile à préciser en raison de la modification de ses couleurs. L'une d'elles est essentiellement jaune sur ses deux faces, avec une zone latérale vermillon sur la face dorsale *(voir la photographie page 46)*. L'autre, plus orangée, présente encore à la base une zone bleuâtre, probablement d'origine structurale. Nous les avons comparées à des plumes vertes sur leur face dorsale – identiques provenant d'un *Amazona ochrocephala*. Des mesures spectrales caractérisent les propriétés optiques et colorimétriques des plumes et des observations au microscope électronique à balayage visualisent les modifications structurales induites par le tapirage.

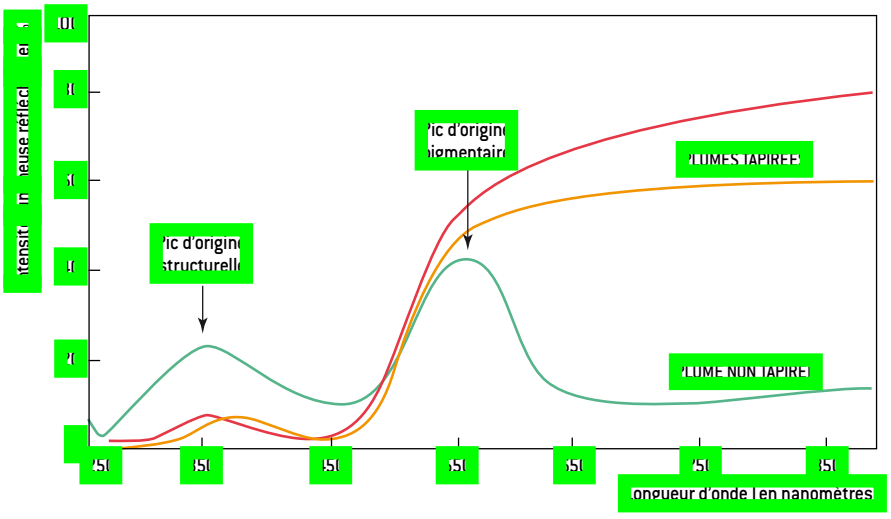
Des changements dans la structure des barbes

Les spectres de réflexion des plumes vertes des Psittacidés sont essentiellement composés de deux grands pics, centrés sur 575 nanomètres de longueur d'onde, dans le jaune, et 380 nanomètres, à la frontière des ultraviolets et du domaine visible *(voir le graphique page 46)*. Des mesures en incidence variable montrent de plus que ce dernier pic se déplace légèrement vers les petites longueurs d'onde quand l'angle d'incidence de la lumière augmente, ce qui est la signature d'une origine physique de cette couleur. La position du pic jaune





LA COULEUR DES PLUMES des oiseaux de type perroquet *(a)* provient des barbes *(b, c, d)*. Celles-ci comportent des cellules géantes où se concentrent des mélanosomes *(d, à gauche)*, granules de psittacine (un pigment). Les barbes contiennent aussi des structures spongieuses *(d, à droite)*, dont l'effet est de diffuser la lumière bleue. Dans les barbes d'une plume tapirée, les cellules géantes sont dépourvues de mélanosomes et les structures spongieuses, plus désordonnées, ont une périodicité spatiale légèrement plus grande.



LE SPECTRE DE REFLEXION

d'une plume non tapirée comporte deux pics. Pour la plume naturelle comme pour la plume tapirée *(cliché à droite)*, le premier pic se déplace vers les courtes longueurs d'onde quand l'angle d'incidence de la lumière augmente (phénomène d'iridescence). Cela signe son origine structurelle. Le second pic ne se déplace pas avec l'angle d'incidence, ce qui confirme son origine pigmentaire. Avec le tapirage, ce pic disparaît.

est indépendante de l'angle d'incidence, ce qui indique au contraire une origine pigmentaire.

Les spectres des plumes tapirées présentent un aspect bien différent. Le pic situé dans le jaune a disparu pour laisser place à un plateau caractéristique des couleurs orangées, et le premier pic à la frontière de l'ultraviolet est considérablement réduit et décalé vers le visible. Cela indique une profonde modification de la structure photonique. Le tapirage agit donc à la fois sur la nature des pigments et sur la nanostructure des plumes. Les analyses structurales effectuées au microscope électronique à balayage le confirment.

La première constatation est la disparition totale des mélanosomes dans les cellules géantes des barbes. La seconde est moins évidente directement, mais une analyse fine de la structure photonique montre une période spatiale moyenne légèrement plus importante (ce qui explique le décalage du pic de réflexion vers les grandes longueurs d'onde) ainsi qu'une organisation moins régulière.

En 1992, Dante Teixeira et ses collègues, de l'université fédérale de Rio de Janeiro, ont tenté de tapirer des perroquets amazones en laboratoire, sans résultats vraiment concluants. Il est clair que la simple description des recettes et des techniques faites par les explorateurs et voyageurs scientifiques des siècles passés ne permettront pas de reproduire correctement le processus. Seule une étude relativement longue sur le terrain permettrait d'apprécier et de comprendre la réalité du tapirage, et de le reproduire un jour en laboratoire pour en percer les principes fondamentaux.

Le chemin est semé d'embûches. D'un point de vue scientifique d'abord, il ne peut s'agir que d'une démarche pluridisciplinaire faisant intervenir des domaines très éloignés et peu habitués – ou enclins – à travailler ensemble : ethnologues, artistes, chimistes, physiciens et généticiens.

Un savoir-faire en voie de disparition

La loi d'éthique sur les expérimentations animales est un autre aspect à ne pas négliger est. Les toxines des Dendrobatidés sont violentes et il est évident qu'une telle intervention occasionne des souffrances aux perroquets, par ailleurs tous protégés. En laboratoire, l'expérience ne pourrait se faire que sous anesthésie, ce qui, chez les oiseaux, est difficile (mais pas insurmontable).

L'aspect humain est beaucoup plus problématique et inquiétant. Le dernier peuple à pratiquer le tapirage semble être celui des Enawenê-Nawê. Rattaché à la famille linguistique des Arawaks, habitant en territoire indien protégé au Mato Grosso, son premier contact avec notre civilisation est très récent : 1973. On comptait alors cent trente personnes rassemblées dans un unique village. Ils seraient aujourd'hui environ cinq cents, mais une partie du territoire est menacée par la construction d'un barrage. On sait ce qu'implique un tel processus : déplacement et acculturation. L'étonnante démarche artistique qu'est le tapirage risque de disparaître à jamais avant que nous n'en ayons percé les secrets physiques, chimiques et biologiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

Brésil indien - Les arts des Amérindiens du Brésil, Réunion des Musées Nationaux, 2005.

M. Pomarède, **La couleur des oiseaux**, *Dossier Pour la Science* n° 22, avril-juillet 2000.

D. M. Teixeira, **Perspectivas da etno-ornitologia no Brasil : O exemplo de um estudo sobre a "tapiragem"**, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Serie Zoologia*, vol. 8, pp. 113-121, 1992.

A. Métraux, **Une découverte biologique des Indiens de l'Amérique du Sud : La décoloration artificielle des plumes sur les oiseaux vivants**, *Journal de la Société des Américanistes*, tome 20, pp. 181-192, 1928 (www.persee.fr/doc/jsa_0037-9174_1928_num_20_1_3646).

L'ENSIC, l'ESPCI ParisTech, Chimie ParisTech et l'ECPM vous invitent au :

FORUM HORIZON CHIMIE

30ème anniversaire !

Jeudi 4 février 2016
9h00 - 18h00

Une rencontre privilégiée avec une quarantaine d'entreprises et l'opportunité de postuler à des offres de stage et d'emploi dans des domaines allant de l'énergie à l'agro-alimentaire, en passant par la cosmétique, le secteur pharmaceutique, les sciences des matériaux et les biotechnologies.

Stands d'exposition, conférences, tables rondes, simulations d'entretiens d'embauche et corrections de CV seront mis en place afin de vous aider à approfondir votre projet professionnel et faciliter votre entrée dans le monde du travail.

> Entrée libre

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique
75 007 Paris
Métro Invalides

Pour plus de renseignements:
06 22 23 85 58
www.horizon-chimie.fr

Capter les mou

En amplifiant d'imperceptibles variations de couleurs d'une image à l'autre d'une séquence vidéo, on détecte des mouvements infimes. Avec des applications aussi bien en médecine qu'en ingénierie

Les premiers microscopes, aux XVI[e] et XVII[e] siècles, ont transformé des lamelles de verre en apparence complètement transparentes en un univers grouillant de bactéries, de cellules, de grains de pollen et de cristaux complexes. Grâce à ces instruments, les scientifiques ont accédé à un monde invisible à l'œil nu.

À notre avis, un nouveau type de microscope est en passe de dévoiler un autre monde tout aussi nouveau et fascinant : un monde de mouvements et de variations de couleurs trop infimes pour être saisis par l'œil humain. Les pulsations sanguines qui parcourent un visage le rendent tour à tour plus rouge ou plus blanc, le vent peut faire osciller très légèrement une grue de chantier, et la respiration d'un bébé est souvent si subtile qu'elle échappe à notre regard. Ces changements sont extrêmement petits, mais peuvent être importants. Ils révèlent notre état de santé ou des vibrations parasites d'une machine sur le point de tomber en panne. Avec nos collègues, nous avons développé un « microscope du mouvement », qui associe une caméra vidéo et un logiciel de traitement d'images approprié. Cet outil amplifie les mouvements qui animent des personnes ou des objets complètement immobiles en apparence.

Nous avons découvert notre microscope du mouvement par un heureux hasard. Initialement, nous travaillions sur un projet visant à mesurer de minuscules changements de couleur, trop faibles pour être distingués à l'œil nu.

Notre objectif initial était d'utiliser une caméra vidéo pour mesurer le pouls d'une personne en détectant les minuscules variations de couleur dues à la circulation du sang dans son visage, rythmée par les battements du cœur. Le changement de couleur de chacun des pixels en réponse à la circulation sanguine est de seulement 0,2 % sur un cycle cardiaque. Or les capteurs des caméras ne détectent pas des valeurs exactes et ils enregistrent aussi du bruit aléatoire, dont l'amplitude est souvent

vements invisibles

Frédo Durand, William Freeman et Michael Rubinstein

supérieure à 0,2 %. Ce bruit masque donc les variations de rougeur.

En 2010, Rosalind Picard, Ming-Zher Poh et Daniel McDuff, du Media Lab du MIT (Institut de technologie du Massachusetts) avaient pu mesurer le pouls à partir des variations de couleur, mais nous avions l'intuition que leurs calculs, faisant intervenir des notions mathématiques élaborées, étaient plus compliqués que nécessaire.

Avec notre étudiant Hao-Yu Wu, John Guttag, du MIT, et Eugene Shih, alors à Quanta Research Cambridge, nous avons décidé de remplacer le nombre représentant la couleur de chaque pixel par une moyenne de tous les pixels voisins. Cette méthode réduit le bruit puisque ces fluctuations aléatoires ont tendance à se compenser mutuellement dans un groupe de pixels assez grand. Nous avons aussi éliminé les changements de couleur qui se produisaient plus rapidement ou plus lentement que les valeurs typiques du pouls chez l'adulte à l'état de repos.

Notre approche simple s'est révélée fructueuse pour convertir les changements de pixels en nombre de battements par minute. Mais ces changements de couleur étaient invisibles à nos yeux, et nous voulions voir à quoi ils ressemblaient. En amplifiant d'un facteur 100 les changements de rougeur, nous sommes parvenus à voir clairement le visage d'un homme adulte rougir à chaque battement de cœur.

Cette technique fonctionne aussi pour les bébés. Avec les médecins Donna Brezinski et Karen McAlmon, alors à l'hôpital de Winchester, dans le Massachusetts, nous avons filmé des nouveau-nés avec un appareil photo numérique classique. En utilisant notre technique d'amplification, nous avons mesuré le pouls sur la vidéo ; il correspondait parfaitement à celui mesuré par un cardiofréquencemètre attaché à un doigt du bébé. Une telle mesure du pouls, sans contact, pourrait être utile pour les nouveau-nés prématurés, si fragiles qu'il vaut mieux éviter de les toucher. Pour les adultes, ces visualisations permettront, par exemple, de détecter des anomalies de la circulation sanguine susceptibles de traduire des problèmes de santé, tels que des asymétries de la circulation sanguine entre les côtés gauche et droit du corps.

Un monde toujours en mouvement

Nos vidéos nous ont confrontés à une énigme. Afin de simplifier le traitement des couleurs, nous avions demandé aux sujets adultes qui se tenaient devant nos caméras de se tenir immobiles, et leur tête semblait effectivement dénuée de mouvements dans les vidéos initiales. Mais quand nous avons regardé les résultats amplifiés, nous avons remarqué que les têtes bougeaient. Notre technique semblait accentuer non seulement

EN AMPLIFIANT LES VARIATIONS de couleurs du visage, le rougissement de la peau dû à la circulation sanguine devient visible. Cette technique permet de mesurer le pouls, mais aussi de révéler des mouvements infimes.

es changements de couleur, mais aussi les mouvements imperceptibles.

Dans des travaux antérieurs avec d'autres collègues, nous nous étions intéressés à l'amplification de mouvements infimes dans des vidéos. Nous avions utilisé des logiciels spécialisés qui modélisent et calculent le vecteur déplacement de chacun des pixels de l'image. Ce traitement était lourd et sujet à des erreurs. Nous étions maintenant stupéfaits : notre nouvelle approche parvenait à faire la même chose avec des calculs simples et sans recourir aux laborieux vecteurs du mouvement.

De la couleur au mouvement

Pourquoi les changements de couleur accentués grossissaient-ils aussi ces petits mouvements ? Pour le comprendre, nous avons étudié comment le mouvement dans une vidéo se traduit en termes de changements locaux de couleur. Imaginez une balle éclairée par la droite : le côté droit de la balle est lumineux et le côté gauche est sombre. Considérez un pixel donné sur l'écran : si la balle traverse l'écran de gauche à droite, le pixel représente d'abord un point éclairé de la balle, puis s'assombrit à mesure qu'il représente un point de plus en plus à gauche de la balle. La variation dépend de la vitesse de la balle et de la transition abrupte de luminosité entre les côtés gauche et droite de la balle, ce qu'on nomme le gradient de couleur. Mathématiquement, le changement de couleur d'un pixel par unité de temps est égal au produit de la vitesse de l'objet par le gradient de couleur.

Notre algorithme, bien sûr, ne connaît ni les gradients de couleur ni la vitesse des objets dans les vidéos. Toutefois, parce qu'il amplifie le changement de couleur en chaque point quand la balle se déplace d'une fraction de centimètre vers la droite, il amplifie aussi ce mouvement infime de la balle pour le rendre visible à vos yeux. De la même façon, les couleurs des pixels représentant des points particuliers de la poitrine d'un bébé changent à mesure que celui-ci respire, et en accentuant les changements de couleur, on rend beaucoup plus visible le très léger mouvement de la poitrine.

La différence entre nos précédents travaux portant sur les vecteurs déplacement et notre nouvelle approche fondée sur les variations temporelles de couleur est une question de perspective. En faisant une analogie avec une rivière, la différence revient à suivre le mouvement de l'eau ou à rester immobile au milieu du courant. C'est ce changement de point de vue qui rend nos calculs beaucoup plus simples. En mécanique des fluides, les physiciens utilisent ces deux approches pour modéliser les écoulements : l'approche dite lagrangienne consiste à suivre une quantité donnée de fluide lors de son déplacement dans l'espace, comme un observateur sur un bateau suit le flot d'une rivière ; à l'inverse, l'approche dite eulérienne fixe un lieu de l'espace et étudie le fluide qui y passe, comme si l'observateur se tenait sur un pont.

Nous avions adopté le point de vue lagrangien dans nos premiers travaux, et nous étions comme des observateurs sur un bateau : les pixels sont suivis sur la vidéo et déplacés de point en point suivant des vecteurs amplifiés. En revanche, notre nouvelle approche considère le changement de couleur en un lieu fixe, comme lorsque l'observateur reste sur le pont. Cette perspective locale ne s'applique qu'à de petits mouvements, mais elle est beaucoup plus simple et robuste. À l'aide de cette technique, un ordinateur traite rapidement une vidéo, alors que nos travaux précédents nécessitaient un long temps de calcul, avec des erreurs fréquentes.

Amplification eulérienne

En 2012, dans un article traitant de cette méthode que nous nommons « amplification vidéo eulérienne », nous avons décrit plusieurs exemples d'utilisation, dont le changement de couleur d'un visage sous l'effet de la circulation sanguine, mais aussi l'observation des mouvements respiratoires d'un nourrisson, amplifiés de telle sorte que les parents d'un nouveau-né pourraient surveiller un signal vidéo accentué afin de vérifier que le bébé bouge.

Nous avons aussi pris une vidéo à grande vitesse d'une guitare dont toutes les cordes vibraient et nous avons sélectionné d'étroites bandes de fréquences autour de certaines notes pour isoler et amplifier une corde à la fois, par exemple l'intervalle entre 72 et 92 hertz pour la corde de mi grave vibrant à 82 hertz. Les autres cordes paraissaient absolument immobiles.

Nous avons créé un site Internet où les gens pouvaient télécharger leurs vidéos et appliquer notre outil d'amplification du mouvement *(pour des exemples, voir https://lambda.qrilab.com/site/)*. Les visiteurs

LES AUTEURS

Frédo DURAND est professeur de génie électrique et d'informatique au MIT (Institut de technologie du Massachusetts). Il est spécialiste des techniques numériques de photographie.

William FREEMAN est professeur de génie électrique et d'informatique au MIT. Il étudie l'application de l'intelligence artificielle à la vision par ordinateur.

Michael RUBINSTEIN est chercheur chez Google ; il travaille sur la vision par ordinateur.

L'ESSENTIEL

- **Même quand ils semblent à nos yeux parfaitement immobiles, les objets et les personnes sont animés de minuscules mouvements.**
- **En amplifiant les changements de couleur des pixels d'une vidéo image après image, les chercheurs ont créé un « microscope du mouvement » qui rend ces transformations visibles.**
- **Cet outil peut rendre de nombreux services : suivi du rythme cardiaque ou de la respiration, recherche de défauts de fonctionnement dans les machines, etc.**

'ont utilisé pour en faire des choses aux-quelles nous n'avions pas pensé, ce qui était passionnant. Une personne a posté une vidéo montrant des mouvements fœtaux en fin de grossesse. Une étudiante en art a réalisé une vidéo mettant en évidence les expressions et mouvements imperceptibles de ses amis qui essayaient de rester immobiles.

Notre approche eulérienne a tout de même ses limites. Si un pixel d'entrée donné s'assombrit beaucoup d'une image à la suivante, l'ordinateur accentue trop ce changement, produisant un pixel complètement noir par un effet d'amplification incontrôlé. Ce type de problème crée des halos sombres ou lumineux autour des zones de mouvement. Par ailleurs, les variations de couleur d'entrée liées au bruit du capteur posent aussi problème parce que, même si nous les lissons en faisant une moyenne locale sur un grand nombre de pixels, le bruit reste amplifié.

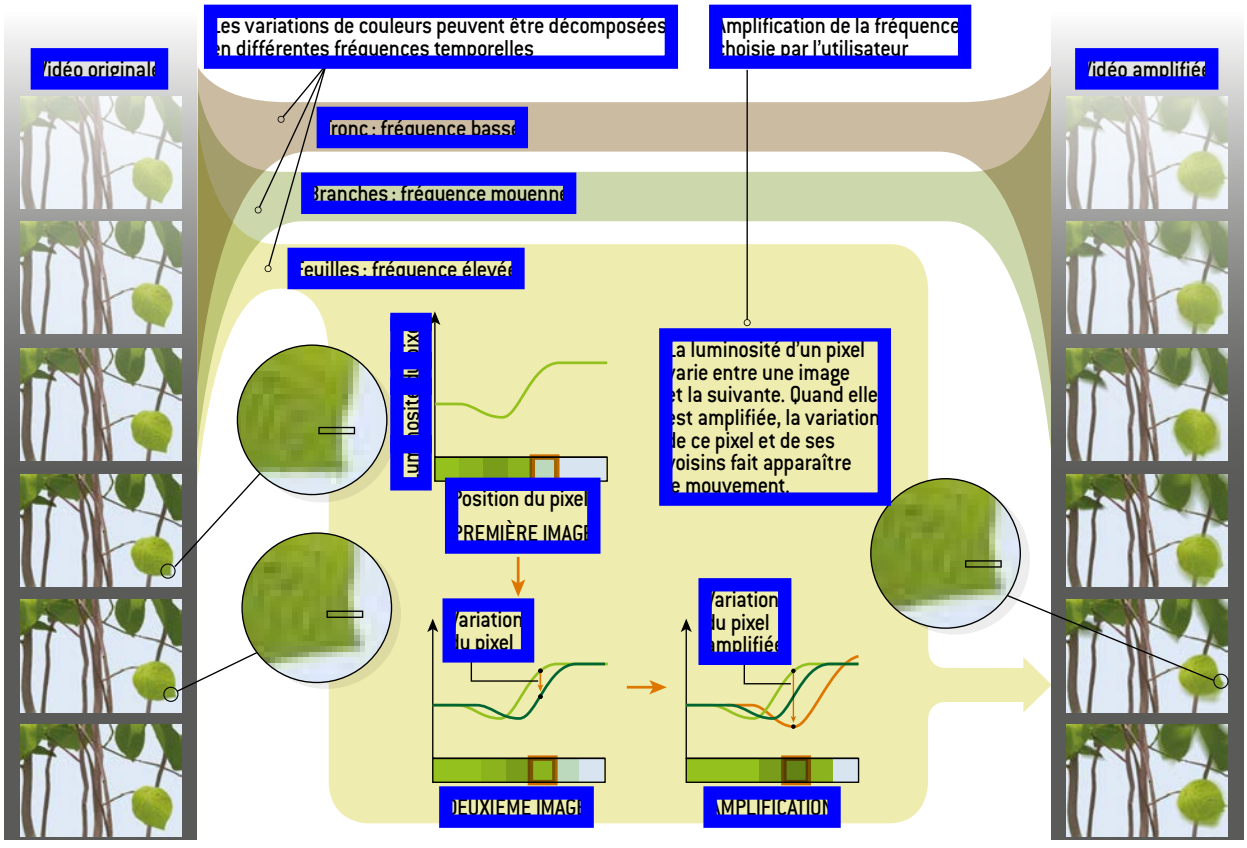
Ces résultats nous ont incités, avec notre étudiant en thèse Neal Wadhwa, à développer un nouvel algorithme qui préserve les bénéfices des approches eulériennes simples tout en donnant une meilleure vision quand les changements deviennent extrêmes.

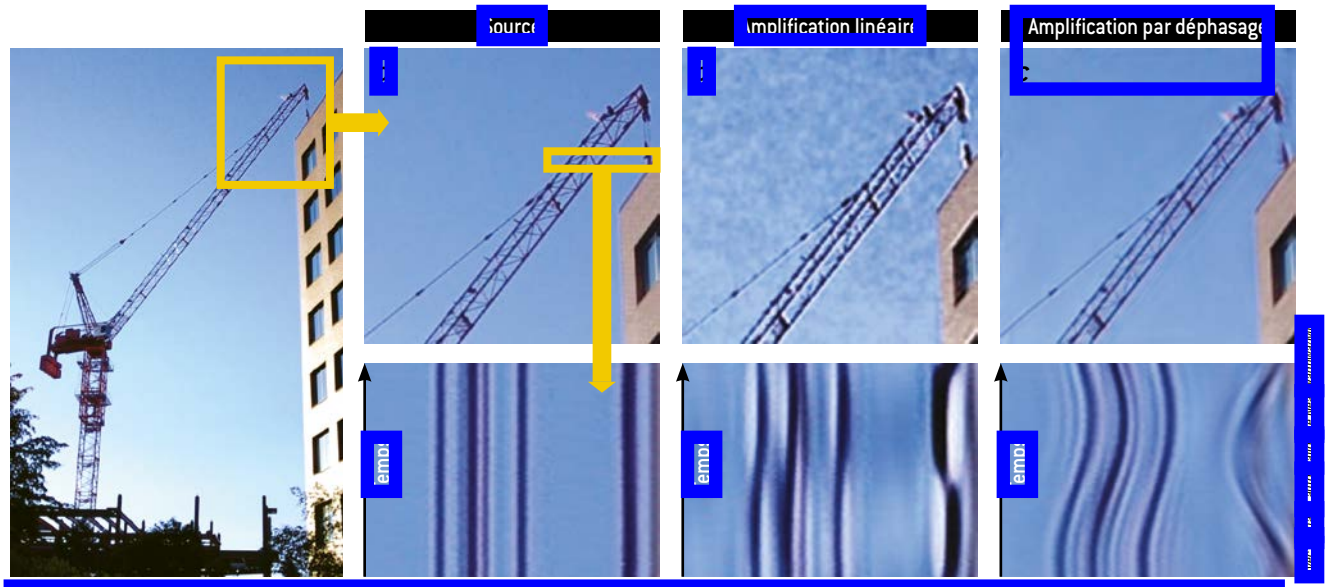
Nous nous sommes rendu compte que l'origine des limites de notre méthode initiale est qu'elle traite de la même façon les bords et les zones uniformes qui les entourent, alors que les bords correspondent à des différences de couleurs beaucoup plus grandes (des gradients plus importants). Ainsi, si vous essayez d'amplifier tous les pixels avec le même facteur et en même temps, vous obtenez des distorsions (des effets de saturation) qui ne correspondent pas à des mouvements réels.

Au lieu d'amplifier avec un même facteur, nous avons opté en 2013 pour une approche plus fine qui utilise des techniques modernes de traitement du signal et de l'image. De façon analogue à une décomposition classique de Fourier où le signal est représenté par une somme de fonctions sinusoïdales, nous modélisons l'image (l'ensemble de ses pixels) par une somme de fonctions appropriées, selon une technique dite de pyramides qui analyse plusieurs échelles de résolution. De la même façon qu'un changement de phase des fonctions sinusoïdales dans une analyse de Fourier correspond à une translation, un changement de phase des fonctions utilisées dans notre approche correspond à un mouvement local dans un groupe de pixels de l'image. Cette technique permet de caractériser plus facilement l'ampleur du mouvement qui sépare deux images

TRANSFORMER LES CHANGEMENTS DE COULEUR EN MOUVEMENT

Sur une vidéo, chaque pixel représente un point d'un objet, une feuille d'arbre par exemple. La couleur de ce pixel change au cours du temps avec le mouvement de la feuille, même de façon imperceptible, parce que la feuille bouge par rapport à la lumière qui l'atteint. Un programme informatique qui amplifie les variations de couleurs d'une image à la suivante amplifie également les minuscules mouvements qui deviennent alors visibles à l'œil nu. Les chercheurs peuvent isoler et amplifier certaines fréquences en jeu, par exemple celles correspondant au tremblement des feuilles ; dans ce cas, on fait ressortir le mouvement des feuilles par rapport à celui de l'ensemble de l'arbre, les branches bougeant à un rythme plus lent.





CETTE GRUE OSCILLE DANS LE VENT de façon imperceptible *(a)*, même si l'on isole une ligne de pixels dont on examine l'évolution au fil du temps en accolant verticalement la même ligne image par image *(en bas)*. En utilisant l'amplification linéaire des couleurs, l'image obtenue est bruitée *(b)*. On distingue des mouvements dans la ligne de pixels, mais des artefacts lumineux et sombres sont présents. La technique d'amplification des auteurs, fondée sur le déphasage, met en évidence le mouvement de la grue sans artefacts *(c)*.

d'une vidéo, et cela sans créer d'artefacts tels que des halos.

Après avoir résolu ces difficultés, nous avons mis à l'épreuve notre microscope du mouvement pour enregistrer des vibrations qui n'avaient jamais été observées, mais seulement prévues théoriquement ou obtenues par simulations numériques. Par exemple, l'enveloppe externe d'un tuyau en PVC est un objet simple. Quand on frappe le tuyau avec un marteau, son enveloppe se courbe et vibre selon des motifs particuliers qui oscillent à différentes fréquences. Les motifs sont décrits théoriquement dans les manuels d'ingénierie, mais il était difficile de visualiser des déformations aussi petites.

Nous avons pris des vidéos à grande vitesse de tuyaux soumis à des coups. Dans la vidéo non traitée, la déformation de la forme circulaire est pratiquement invisible. Justin Chen, doctorant au MIT, a appliqué notre outil à la vidéo, en demandant à l'ordinateur de faire ressortir les trois modes d'oscillation de plus basse fréquence (nous avions appliqué le même principe pour visualiser le pouls humain, en recherchant seulement les changements de pixels qui correspondaient à la plage du rythme cardiaque). L'amplification de ces mouvements a montré que la coupe transversale du tuyau fléchissait alternativement vers l'intérieur et vers l'extérieur, comme prévu par les calculs.

Observer un verre à vin se casser sous la pression du son (des vibrations à haute fréquence) est un autre exemple qui montre à quel point cette visualisation peut être spectaculaire. Nous avons tous vu des films dans lesquels une soprano atteint une note très haute et brise un verre. Mais aucun d'entre nous n'avait jamais vu la déformation du verre, parce qu'elle est en général d'amplitude à la fois trop faible et trop rapide, d'habitude autour de 300-500 hertz. Nous voulions montrer ces déformations en temps réel.

Le verre qui chante

À cette fin, nous avons appliqué une astuce que l'on doit à Harold Edgerton, pionnier de la stroboscopie, à savoir la prise de vues image par image. Il a montré que quand un mouvement périodique rapide est enregistré avec des durées brèves d'exposition pour chaque image, les images étant prises à une fréquence inférieure à celle du mouvement, ce dernier semble beaucoup plus lent qu'il ne l'est en réalité. Nous avons utilisé une caméra vidéo classique pour prendre de brèves vues du verre. Quand nous avons amplifié la vidéo au moyen de notre microscope du mouvement, cet effet stroboscopique nous a permis de voir un verre vibrer sous nos yeux dès qu'il était soumis à la note appropriée.

Outre les vibrations du verre à vin, la technique pourrait révéler des effets plus graves, comme des débuts de panne sur de grosses machines. Le microscope peut détecter et visualiser de légers mouvements anormaux. Nous avons montré ce principe dans une vidéo à grande vitesse d'un moteur automobile tournant au ralenti qui semblait normal en apparence. Comme pour le tuyau, la vidéo brute ne montre aucun mouvement des parties mécaniques. Nous avons alors filtré la vidéo pour mettre en relief les vibrations du moteur à 22 hertz, en bloquant toutes les autres fréquences. Le grossissement d'un facteur 30 des changements filtrés a révélé que différents composants du moteur étaient secoués de part en part. Ce n'était pas anormal pour un moteur, mais cela montre que le microscope du mouvement peut extraire des bandes de fréquences particulières susceptibles de présenter des anomalies, en plus d'amplifier de petits changements afin de les visualiser. De telles vidéos pourraient mettre en lumière le dysfonctionnement de parties mécaniques dans des machines soumises à des rotations et à des vibrations.

Nous avons adopté une approche similaire pour montrer comment une grue géante est secouée par le vent *(voir la figure ci-dessus)*. Bien que la grue semble rigide et immobile aux observateurs, le microscope du mouvement fait apparaître un fléchissement. Pour ces grues, il y a une gamme de mouvements normale, mais si la grue sort de cette gamme, elle peut se rompre.

Nous pouvons également traiter le processus en sens inverse. En utilisant le microscope du mouvement pour mettre en évidence les minuscules vibrations d'objets tels qu'un paquet de chips ou des feuilles d'une plante, nous avons, avec Wadhwa et Abe Davis du MIT et Gautham Mysore d'Adobe Research, reconstitué le type de bruit qui les secouait (par exemple la voix d'une personne dans la pièce). Si l'on appliquait cette méthode à une grosse turbine industrielle, par exemple, ou à la rampe de béton d'un terminus de bus, cela pourrait être un moyen d'identifier les sources de vibrations susceptibles de fragiliser la structure.

Dans l'écoulement d'un fluide, le microscope détecterait des phénomènes de turbulence. Autour de véhicules, qu'il s'agisse d'automobiles, d'avions ou de sous-marins, de telles turbulences ont un effet fortement négatif sur la vitesse de la machine. On ne peut pas discerner ces ondes sur des vidéos non traitées, mais quand on amplifie certaines fréquences de mouvement avec notre dispositif, les signes d'instabilité des ondes se manifestent clairement pour l'observateur. Nous n'en sommes qu'aux prémices du microscope du mouvement, mais déjà les idées d'application sont nombreuses.

Parce que le logiciel est rapide et capable de traiter instantanément une vidéo pour révéler un phénomène invisible, on peut avoir l'impression de mettre des lunettes magiques ou d'être soudain doué d'une vision surhumaine. Mais ce n'est pas de la magie, ni le rêve d'un créateur de bandes dessinées. Cette technique est le résultat de recherches élémentaires en traitement vidéo et en représentation mathématique des images. Les chercheurs l'ont déjà exploitée pour mettre en évidence des phénomènes qu'ils n'avaient jamais pu voir de leurs propres yeux. Elle pourrait, comme les premiers microscopes optiques d'il y a trois ou quatre siècles, nous aider à identifier des risques pour la santé ou la sécurité. Pour l'instant, elle nous donne l'impression d'être des explorateurs, émerveillés de découvrir tout un monde de mouvements autour de nous, cachés sous nos yeux. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Wadhwa *et al.*, **Phase-based video motion processing**, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, n° 4, article n° 80, 2013. Vidéo à voir : http://people.csail.MIT.edu/nwadhwa/phase-video

Hao-Yu Wu *et al.*, **Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world**, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31(4), article n° 65, 2012 (http://people.csail.MIT.edu/mrub/papers/vidmag.pdf).

Combattre la douleur chronique

Stephani Sutherland

Brûlures, élancements, douleurs sourdes… Quelle que soit sa forme, la douleur chronique défie les traitements. Mais de nouvelles découvertes sur ses causes ouvrent des pistes inédites pour enfin la juguler.

« Surtout va chez l'épicier, pas au Burger King », précise Jama Bond à son mari parti lui chercher des glaçons par une nuit de 2012. « Leurs glaçons fondent trop vite ». Jama Bond, alors âgée de 38 ans et enceinte de presque neuf mois, a les pieds rouges, gonflés et douloureux. Pour calmer la douleur sans irriter sa peau, elle enveloppe ses pieds de sacs-poubelles et les immerge dans de l'eau glacée. Quelques mois plus tôt, Jama Bond était une jeune femme en bonne santé, employée de bureau dans une société d'installation de panneaux solaires, menant une vie normale à Santa Rosa, en Californie. Mais depuis, se doucher est devenu pour elle une torture.

Jama Bond souffre d'une maladie nommée érythromélalgie (du grec signifiant « douleur des membres rouges »), caractérisée par une forte sensation de brûlure aux mains ou aux pieds, lesquels deviennent extrêmement sensibles, même à une faible chaleur ou à une légère pression. Dans la plupart des cas, comme pour Jama Bond, la maladie survient sans raison (elle n'a pas de lien avec la grossesse). L'érythromélalgie est une maladie rare qui ne touche que treize personnes environ sur un million, mais la douleur chronique sous ses innombrables formes est fréquente et a souvent des origines mystérieuses.

On estime que cent millions de personnes aux États-Unis souffrent de douleurs chroniques, le plus souvent sous la forme de douleurs dorsales, de maux de tête ou d'arthrite. Au total, ces douleurs touchent plus d'Américains que le diabète, le cancer et les maladies cardiovasculaires réunis et coûtent plus cher : 635 milliards de dollars par an en soins médicaux et journées de travail perdues, d'après une analyse de 2012. La situation n'est pas meilleure en Europe *(voir les chiffres page 56)*. Le coût en souffrance est incalculable. Les personnes atteintes de douleurs chroniques ont un risque plus élevé d'invalidité, de dépression, de troubles de l'humeur et du sommeil, de dépendance aux drogues ou à l'alcool et de suicide.

La douleur a une utilité : elle constitue un système d'alarme intégré contre les

L'ESSENTIEL

- Les douleurs chroniques touchent plus de 20 % de la population mondiale.
- Les opiacés et les autres médicaments disponibles ne sont pas toujours efficaces pour soulager les personnes atteintes et présentent parfois des risques importants.
- Toutefois, les recherches sur les voies de signalisation spécifiques de la douleur ont révélé de nouvelles cibles prometteuses.
- Des substances extraites du venin d'animaux figurent parmi celles testées en tant qu'analgésiques.

DANS UNE FORME DE DOULEUR CHRONIQUE, les pieds ou les mains sont comme brûlés et deviennent horriblement sensibles à la moindre chaleur et au plus léger effleurement.

L'AUTEUR

Stephani SUTHERLAND est docteur en neurosciences et journaliste scientifique en Californie du Sud

atteintes corporelles, nous contraignant à retirer la main d'une cuisinière chaude avant la brûlure ou à arrêter de marcher sur une jambe fracturée. Parfois cependant, elle persiste longtemps après que l'alerte a disparu. En général, les douleurs chroniques se divisent en deux catégories : les douleurs inflammatoires, telles celles causées par l'arthrose, et les douleurs neuropathiques, qui résultent souvent d'une lésion nerveuse due à une blessure, une maladie ou une autre atteinte.

Les opiacés, inadéquats contre les neuropathies

La douleur chronique est connue pour être difficile à traiter et le type neuropathique représente un défi particulier, notamment parce que les médicaments anti-inflammatoires courants, tels l'ibuprofène et le naproxène, sont peu efficaces contre lui. La morphine et d'autres opiacés constituent le traitement de référence contre la douleur intense de courte durée, mais ils ont des effets secondaires allant de la constipation et la somnolence à, s'ils sont fortement dosés, un arrêt respiratoire engageant le pronostic vital. Les personnes qui les utilisent sur des périodes prolongées développent peu à peu une accoutumance à ces médicaments : des doses de plus en plus élevées leur sont nécessaires, ce qui augmente les risques associés à leur prise.

L'addiction et l'abus constituent un autre problème grave des opiacés : aux États-Unis, les décès dus à une dose excessive de ces médicaments sont plus nombreux que ceux liés à des overdoses d'héroïne. D'autres molécules utilisées, prescrites à l'origine pour traiter les crises d'épilepsie et la dépression, ont aussi leurs limites.

La recherche de médicaments plus sûrs et plus efficaces a longtemps stagné, mais un changement s'opère depuis quelques années. De récentes découvertes sur les voies de signalisation de la douleur ont ouvert plusieurs perspectives prometteuses pour le développement de médicaments.

La douleur résulte d'un échange rapide de signaux entre des terminaisons nerveuses et le cerveau. Tout commence avec un stimulus que détectent des cellules nerveuses spécialisées – des nocicepteurs – dont les terminaisons sont réparties sur toutes les surfaces, internes et externes, de l'organisme. Les stimuli susceptibles d'endommager le corps (très haute ou très basse température, force mécanique, produit chimique dangereux) activent ces terminaisons nerveuses, qui envoient alors des signaux vers les corps cellulaires des nocicepteurs, localisés dans des structures situées juste à côté de la moelle épinière, les ganglions rachidiens de la racine dorsale. De là, les nocicepteurs relayent l'alerte à des neurones de la moelle épinière. Ces derniers déclenchent à leur tour le vaste réseau cérébral traitant la douleur, y compris des zones intervenant dans la pensée et l'émotion (ce qui explique pourquoi les placebos et les distractions calment parfois la douleur).

Comme tous les signaux nerveux, les messages de douleur se propagent rapidement d'une extrémité d'un neurone à l'autre par le biais d'une impulsion électrique nommée potentiel d'action, créée par un flux d'ions (des atomes de sodium et de potassium portant des charges électriques) à travers une membrane cellulaire. Ces ions traversent de minuscules pores de la membrane – des canaux ioniques – constitués de protéines qui changent de forme pour adopter une configuration ouverte ou fermée *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Une course de relais

Aux terminaisons des nocicepteurs, des canaux ioniques spécialisés détectent les menaces potentielles, telles que la chaleur ou des composés chimiques qui se répandent à partir de cellules voisines endommagées. Lorsque ces canaux s'ouvrent, des ions positifs inondent la cellule, modifiant légèrement le potentiel de la membrane. Cette modification active l'ouverture d'autres canaux ioniques sensibles à certains potentiels.

Lorsqu'un nombre suffisant de ces canaux ioniques, dits tensiodépendants, s'ouvrent, le flux d'ions qui en résulte crée un potentiel d'action qui se propage rapidement le long du neurone, un peu comme l'ondulation qui parcourt la foule lors d'une ola dans un stade. Le potentiel d'action culmine avec la libération d'un neurotransmetteur dans la moelle épinière, un message chimique qui transmet l'information à un neurone voisin.

Quelques chiffres

2 à 50 % de la population mondiale sont atteints de douleur chronique selon les études.

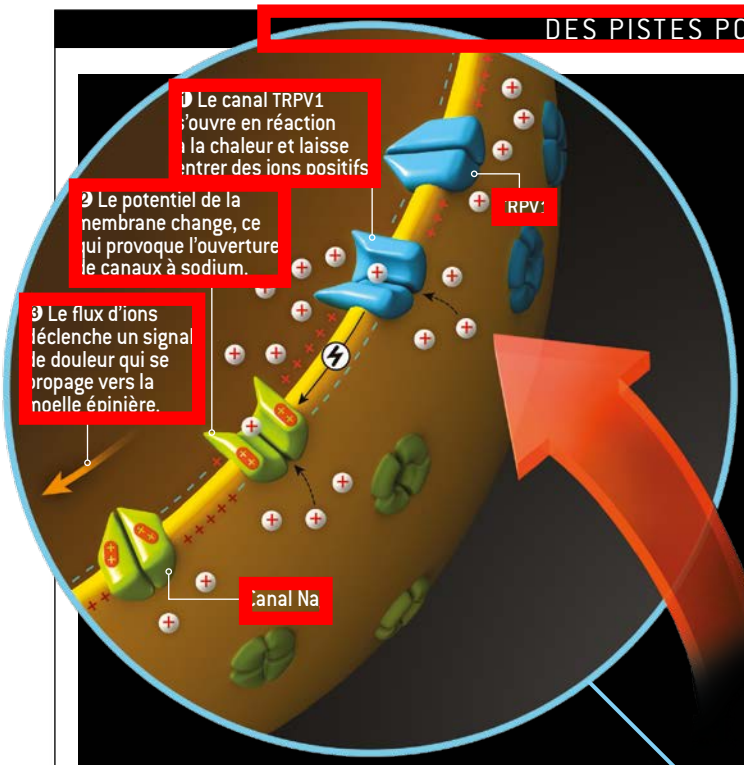
19 % des Européens souffrent de douleurs chroniques moyennes à sévères, au point que leur vie sociale et professionnelle en est perturbée.

Un tiers des Européens atteints de douleurs chroniques ne sont pas traités.

40 % des Européens souffrant de douleurs chroniques n'ont pas une prise en charge adéquate de leur douleur.

Près d'un tiers des Français expriment une douleur quotidienne depuis trois mois, selon un rapport de la Haute autorité de santé paru en 2009.

Les signaux de douleur produits par la chaleur ou d'autres stimuli se propagent à partir des terminaisons nerveuses de la peau ou d'autres sites vers des structures proches de la moelle épinière – les ganglions rachidiens de la racine dorsale –, puis dans la moelle épinière et le cerveau. Toutefois, il arrive que des mutations génétiques ou des lésions des nerfs modifient le comportement de molécules clés sur ce trajet, notamment de canaux ioniques, de telle manière que la douleur devient chronique. Les neurobiologistes ciblent ces molécules critiques de diverses façons dans l'espoir de calmer la douleur.

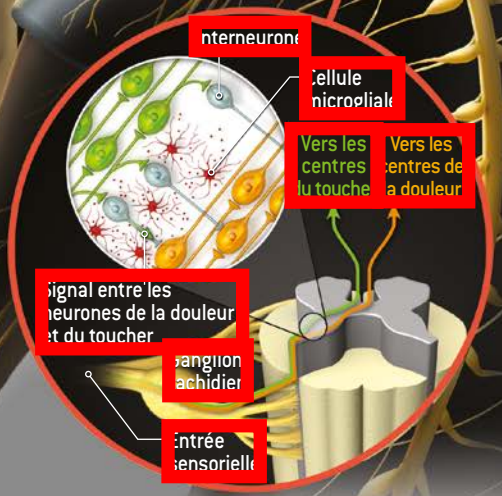


DES CANAUX HYPERACTIFS

Ancrés dans la membrane des terminaisons nerveuses qui détectent les stimuli douloureux, des groupes de molécules forment des « canaux ioniques », pores qui s'ouvrent et se ferment en réaction aux stimuli. Un canal nommé TRPV1, par exemple, détecte la chaleur. Lorsqu'il s'ouvre, des ions chargés positivement affluent vers l'intérieur, ce qui, notamment, augmente le potentiel électrique de la membrane. En réponse, des canaux à sodium sensibles au potentiel (Na_V) s'ouvrent et provoquent l'envoi d'un signal de douleur vers la moelle épinière. Des anomalies sur les canaux Na_V ou TRPV1 peuvent entraîner une signalisation excessive. Des molécules en cours d'étude visent à diminuer l'activité de ces canaux afin d'annuler le surplus de signalisation.

DES CONNEXIONS CROISÉES

Certains nerfs qui détectent les signaux sensoriels sont spécialisés dans la transmission de la douleur ; d'autres convoient la sensation du toucher. Des cellules de la moelle épinière, les interneurones *(en bleu)*, régulent la communication entre ces deux voies. Cette régulation est souvent perturbée chez les personnes souffrant de douleur chronique, qui ont alors une allodynie – la perception d'une douleur en réponse à un stimulus anodin, tel un léger contact. Cette maladie peut survenir après une lésion nerveuse, quand des cellules immunitaires – les cellules microgliales – émettent des signaux chimiques qui entraînent la perte d'une molécule neuronale essentielle pour la signalisation, la protéine KCC2. Des chercheurs travaillent sur des moyens de réparer ce court-circuit et soigner l'allodynie



Pourquoi moi ?

Prenons dix personnes souffrant de la même blessure au dos après un accident de voiture : chez trois d'entre elles, la blessure se muera en douleur chronique. De même, une lésion nerveuse – ou neuropathie –, mais la lésion ne provoquera une douleur continue que chez trois d'entre elles.

Quels facteurs rendent certaines personnes plus sensibles à la douleur chronique que d'autres ? La question n'est pas encore entièrement résolue, mais la recherche pointe trois influences principales qui semblent agir de conserve.

La première influence est notre constitution physique. Les gènes contribuent à déterminer la sensibilité et la tolérance d'un individu vis-à-vis de la douleur et certains font pencher la balance vers une sensibilité inhabituelle à la douleur chronique. L'un des facteurs génétiques les plus influents est le sexe : les femmes ont une probabilité plus élevée que les hommes de développer une douleur chronique au cours de leur vie.

Nos expériences influent aussi sur notre vulnérabilité à la douleur chronique. Le stress, les traumatismes et les abus, tant physiques qu'émotionnels, peuvent augmenter le risque qu'une douleur chronique s'installe. Des études suggèrent que ces expériences pourraient provoquer des modifications de longue durée de l'activité des gènes, allumant ou éteignant certains d'entre eux de telle façon que les voies de transmission de la douleur en seraient perturbées. De plus, le risque de douleur chronique augmente avec l'âge, pas seulement à cause de l'usure, mais probablement aussi parce que la capacité de l'organisme à réparer les blessures (y compris les lésions nerveuses) diminue quand nous vieillissons.

Enfin, notre personnalité joue aussi. Certains traits de caractère biaisent le risque. Les pessimistes, les inquiets et les catastrophistes ont plus de risque de souffrir. Les circuits cérébraux intervenant dans la motivation et la récompense semblent également influer sur la sensibilité à la douleur.

– S. S.

Denk et al., Nature Neuroscience, vol. 17, pp. 192-200, 2014

La douleur dans le cerveau

Plusieurs régions du cerveau pourraient être impliquées dans la vulnérabilité à la douleur. En particulier, des différences de structure, de connexion et de fonction ont été observées dans les régions du circuit de la récompense *(en gris)* – dont le cortex préfontal médian *(1)* et ventrolatéral *(2)*, le noyau accubens *(3)* et l'hippocampe *(4)* – et dans les régions qui modulent les voies descendantes de la douleur, du cerveau à la corne dorsale de la moelle épinière *(en jaune)* – dont le cortex cingulaire antérieur *(5)*, l'hypothalamus *(6)* et l'amygdale *(7)*.

La plupart des connaissances sur la douleur acquises au cours des vingt dernières années concernent les canaux ioniques : comment ils détectent des signaux tels que la chaleur et les lésions tissulaires ; quels canaux sont nécessaires pour signaler la douleur et quels autres, au contraire, viennent en renfort ; quels canaux pourraient être ciblés pour supprimer en toute sécurité des signaux de douleur indésirables.

La piste des canaux à sodium

Depuis longtemps, les chercheurs et les sociétés pharmaceutiques ont compris que bloquer les canaux à sodium des terminaisons nerveuses calme la douleur : la lidocaïne et la procaïne, des anesthésiants locaux de courte durée d'action, verrouillent ces canaux, ce qui supprime non seulement la douleur mais aussi toute sensation à l'endroit où elles ont été appliquées.

Neuf canaux à sodium tensiodépendants ont été découverts chez l'homme et d'autres mammifères, chacun s'ouvrant en réponse à un potentiel légèrement différent. Les bloquer tous aurait des effets dévastateurs, car il existe des canaux à sodium dans tous les neurones et dans d'autres tissus, notamment le cerveau et le cœur ; un blocage sans distinction interférerait avec les signaux qui commandent les battements cardiaques, la respiration et les mouvements. Depuis des années, les neurobiologistes sont donc en quête d'un graal : des canaux à sodium qui seraient spécifiques aux seules cellules détectant la douleur.

À la fin des années 1990, des chercheurs se sont approchés de cet objectif en découvrant trois canaux à sodium tensiodépendants spécifiques du système nerveux périphérique (par opposition au système nerveux central, constitué de la moelle épinière et du cerveau). Or c'est dans ce système que, en général, les signaux de douleur prennent naissance. Nommés $Na_V1.7$, $Na_V1.8$ et $Na_V1.9$, les trois canaux sont principalement localisés dans les nocicepteurs et certains autres neurones impliqués dans la sensation (« Na » désigne le sodium, « V » le potentiel, et le nombre indique la position dans la famille des neuf canaux ioniques connus). Lorsque les gènes codant ces trois canaux ont été identifiés, les chercheurs ont pu manipuler l'activité des canaux chez des animaux de laboratoire. Au cours des dix années suivantes, des tests ont confirmé que, du moins chez la souris, l'inactivation des canaux Na_V calme la douleur neuropathique.

En 2000, les canaux Na_V étaient considérés comme des cibles prometteuses pour le développement de médicaments, mais les

sociétés pharmaceutiques avaient besoin de preuves de leur intérêt chez l'homme pour justifier un investissement. De telles données ont été fournies dans quatre articles clés qui ont relié le canal $Na_V1.7$ à la douleur chez les humains grâce à l'étude de maladies rares. En 2004, une équipe de Beijing a découvert des mutations du gène de $Na_V1.7$ dans deux familles chinoises atteintes d'une forme héréditaire d'érythromélalgie, la maladie que Jama Bond a développée pendant sa grossesse. En 2005, Stephen Waxman et Sulayman Dib-Hajj, à la faculté de médecine de l'université Yale, ont confirmé que ces mutations entraînent une hyperactivité du canal qui pourrait provoquer la douleur.

Peu après, John Wood et ses collègues de l'University College à Londres ont indiqué qu'une autre maladie – le syndrome de douleur extrême paroxystique, qui cause des douleurs dans le rectum, les yeux et les mâchoires – était aussi due à une suractivité d'un canal $Na_V1.7$ mutant. Enfin, en 2006, Geoff Woods et James Cox, alors à l'université de Cambridge, ont montré que des mutations du gène de $Na_V1.7$ qui supprimaient sa fonction éliminaient aussi la sensation de douleur, créant une maladie rare et dangereuse, souvent fatale en raison de blessures non ressenties. L'ensemble de ces découvertes a confirmé l'importance du canal $Na_V1.7$ dans la sensation de la douleur chez l'homme.

Stephen Waxman explore des maladies génétiques rares parce que, selon lui, elles peuvent révéler des voies pathologiques plus courantes. En 2012, avec des chercheurs aux Pays-Bas, il a franchi ce cap en montrant que les canaux Na_V étaient aussi perturbés dans une maladie plus répandue, la polyneuropathie des petites fibres. Cette maladie désigne une lésion de nerfs périphériques transmettant la douleur, souvent dans les mains ou les pieds. Chez près de la moitié des patients atteints de la maladie, une source des lésions est identifiable, tel le diabète, mais chez l'autre moitié, la cause de la douleur reste un mystère. Stephen Waxman et ses collaborateurs ont examiné l'ADN de patients dont on ignorait la cause de la maladie. Chez près de 30 %, 9 % et 3 % d'entre eux, ils ont trouvé des mutations dans les gènes codant respectivement les canaux $Na_V1.7$, $Na_V1.8$ et $Na_V1.9$. Enfin, de façon plus générale encore, le groupe de Stephen Waxman a aussi observé que chez les personnes souffrant de douleurs chroniques dues à des lésions nerveuses, les canaux $Na_V1.7$ sont plus nombreux dans les nerfs endommagés.

Des analgésiques potentiels testés chez l'homme

Ces résultats étaient suffisants pour que les sociétés pharmaceutiques s'intéressent aux canaux à sodium spécifiques du système nerveux sensoriel. Ainsi, depuis quelques années, Pfizer développe des médicaments visant $Na_V1.7$ et $Na_V1.8$. S'il est encore trop tôt pour dire quand un nouvel analgésique sera disponible, la société en teste plusieurs sur des patients, selon Neil Castle, biologiste à Neusentis, l'unité de recherche sur la douleur et les troubles sensoriels de Pfizer, à Durham, en Caroline du Nord.

Contrairement à des médicaments plus anciens tels que la lidocaïne, ces nouvelles molécules ne visent pas le pore principal du canal, quasi identique d'un type de canal à sodium à un autre. Elles agissent sur une région du canal qui détecte le potentiel membranaire et qui diffère d'un canal à l'autre, ce qui leur confère davantage de spécificité et devrait les rendre plus sûres. En 2013, le groupe de Neil Castle a annoncé la découverte d'un composé chimique qui agit spécifiquement sur cette région du canal $Na_V1.7$. De telles molécules « sont hautement spécifiques, explique Neil Castle, de sorte qu'elles n'ont pas d'effet sur les fonctions cardiaque ou musculaire » – du moins pas lors des premiers essais.

Entre-temps, une équipe de l'université Duke a ciblé elle aussi cette région du canal $Na_V1.7$, mais à l'aide d'un anticorps, une molécule produite par le système immunitaire. Selon une étude publiée en 2014, l'anticorps soulage les douleurs tant inflammatoires que neuropathiques chez la souris et apaise les démangeaisons. Des chercheurs qui explorent la capacité de certains composants de venins à agir

Les nouvelles molécules

ciblent une région spécifique du canal mis en cause

Du venin pour atténuer la douleur

Lorsque Glenn King trait de mille-pattes, ce n'est pas pour se nourrir. Biochimiste à l'université du Queensland, en Australie, il récupère leur poison, ce qui n'est pas connectons une paire de forceps électriques à leurs pinces, appliquons un courant et ils expulsent le venin. »

Les quelques microlitres de liquide pourraient renfermer les clés d'une nouvelle classe d'analgésiques. Les venins constituent des mines naturelles de molécules engourdissant les nerfs et, avec 400 types différents de venins dans son laboratoire, Glenn King est en première ligne des travaux visant à identifier de telles molécules chez des mille-pattes, arachnées, serpents et autres créatures venimeuses.

De grandes sociétés pharmaceutiques se sont efforcées de synthétiser des produits à même de remplacer les analgésiques qui induisent une dépendance, telle la morphine, mais elles ont eu des difficultés pour obtenir des molécules spécifiques des nerfs visés. Les venins, cependant, contiennent naturellement des molécules présentant ce genre de spécificité. Testées sur des animaux de laboratoire, ces molécules engourdissent les nerfs sans endommager le reste de l'organisme.

Les cibles que de nombreux chercheurs visent sont des canaux à sodium tensiodépendants (qui ne s'ouvrent qu'à un certain potentiel électrique), nombreux dans les cellules nerveuses qui détectent la douleur. En particulier, le verrouillage d'un type de canal nommé $Na_V1.7$ empêche la cellule de transmettre un message de douleur vers d'autres parties du corps *(voir l'article de Stephani Sutherland)*. Or certains composants des venins ont juste la forme adéquate et l'activité chimique appropriée pour s'accrocher sur la partie du canal qui détecte le potentiel, ce qui ferme le canal.

En 2013, Glenn King a identifié une molécule de venin, m-SLPTX-Ssm6a, qui se révèle l'un des inhibiteurs les plus sélectifs de $Na_V1.7$. Il l'a découverte dans le venin de la scolopendre chinoise à tête rouge *(Scolopendra subspinipes mutilans)*, qui peut atteindre 20 centimètres de long et qui présente une paire de pinces aussi puissantes que des tenailles *(voir la figure)*. La morsure de l'animal est très douloureuse. Pourtant, la molécule a eu l'effet opposé chez des souris blessées : dans les expériences réalisées, elle a bloqué la douleur mieux que la morphine, et sans effets indésirables sur la pression sanguine, le rythme cardiaque ou la fonction motrice, signe qu'elle n'agissait pas comme un dépresseur du système nerveux central, comme l'aurait fait un opiacé tel que la morphine. L'équipe de Glenn King en a produit une version de synthèse pour voir si la molécule pouvait être fabriquée en tant que médicament, mais cette version n'a pas fonctionné aussi bien. Glenn King suspecte que la préparation initiale contenait des traces d'un autre composant actif. Il travaille sur de nouveaux prélèvements réalisés sur le mille-pattes et y a depuis détecté plusieurs autres agents actifs, qu'il étudie.

Le venin de serpent est aussi une source d'agents bloquant sélectivement des canaux. Anne Baron, de l'Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire (CNRS, université de Nice-Sophia Antipolis), a isolé en 2012 deux molécules analgésiques à partir du venin du mamba noir : « Nous sommes prêts pour un essai clinique. Nous avons réalisé de nombreux tests chez des rongeurs pour évaluer leur toxicité. Avis aux investisseurs… » Les mambalgines – tel est depuis leur nom – verrouillent un ensemble particulier de canaux ioniques des nerfs périphériques, sensibles à l'acide. Comme les canaux à sodium, ces canaux aident les cellules à envoyer des signaux de douleur. Par chance, les mambalgines n'ont pas d'effet sur la plupart des autres canaux ioniques, ce qui pourrait expliquer l'absence d'effets secondaires apparents chez des souris ayant reçu des injections de ces substances.

Viser avec précision les cellules nerveuses n'est pas le seul objectif des recherches sur les venins, comme l'explique David Craik, biochimiste à l'université du Queensland. Si des molécules de venin doivent être avalées sous forme de pilules, elles doivent résister à la digestion. En 2004, l'Administration américaine de l'alimentation et du médicament, la FDA, a approuvé un analgésique nommé ziconotide, à base d'une molécule de l'escargot marin venimeux *Conus victoriae*, mais le médicament n'a pas résisté aux conditions régnant dans l'estomac, de sorte qu'il doit être injecté lentement aux patients à l'aide d'une pompe, ce qui est une procédure lourde.

David Craik a commencé à revoir l'ingénierie des analgésiques dérivés des toxines de *Conus victoriae*. Sa stratégie consiste à transformer les molécules – des chaînes d'acides aminés – en anneaux, beaucoup plus stables puisque les enzymes digestives ne peuvent en couper les extrémités. Administré oralement à des rats, un des composés obtenus, le cVc1.1, s'est révélé cent fois plus puissant que la gabapentine, un traitement courant des douleurs nerveuses. Et cinq autres ont montré une bonne robustesse lors des premières études. Avec des dizaines de milliers d'espèces venimeuses dans le monde, les chercheurs sont convaincus que la découverte de la molécule parfaite n'est qu'une question de temps. « Nous connaissons peut-être 1 % des produits présents dans ces venins », estime Anne Baron.

– Mark Peplow
Journaliste scientifique à Londres

LA SCOLOPENDRE CHINOISE
à tête rouge sécrète un venin dont un composant est capable d'engourdir les nerfs sans être nocif pour le reste de l'organisme.

sur $Na_V1.7$ ont aussi obtenu des résultats intéressants *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Les canaux à sodium ne sont pas les seules cibles visées. Un autre canal ionique, TRPV1, intéresse les chercheurs, car il est principalement présent dans les cellules détectant la douleur. Le canal TRPV1 est un récepteur activé par des molécules de la famille des vanilloïdes (le « V »), telle la capsaïcine, le composé qui rend le piment piquant, et par des températures élevées. Depuis que David Julius et ses collègues de l'université de Californie à San Francisco ont découvert le gène de TRPV1 en 1997, de nombreux scientifiques se sont lancés sur la piste de molécules qui éteindraient les signaux de douleur en verrouillant ce canal. Mais la cible s'est révélée plus compliquée que prévu. Les premiers agents bloquant le canal TRPV1 entraînaient des effets secondaires ingérables, tels qu'une surchauffe corporelle et une insensibilisation à la chaleur. Plus récemment, le canal, qui détecte aussi des acides, des toxines d'araignées et des substances favorisant l'inflammation, s'est révélé un intégrateur complexe de signaux sensoriels. Pour David Julius, le meilleur médicament serait une molécule qui réduirait l'activité du canal lorsqu'il est hyperactif sans perturber sa capacité de détection de la chaleur.

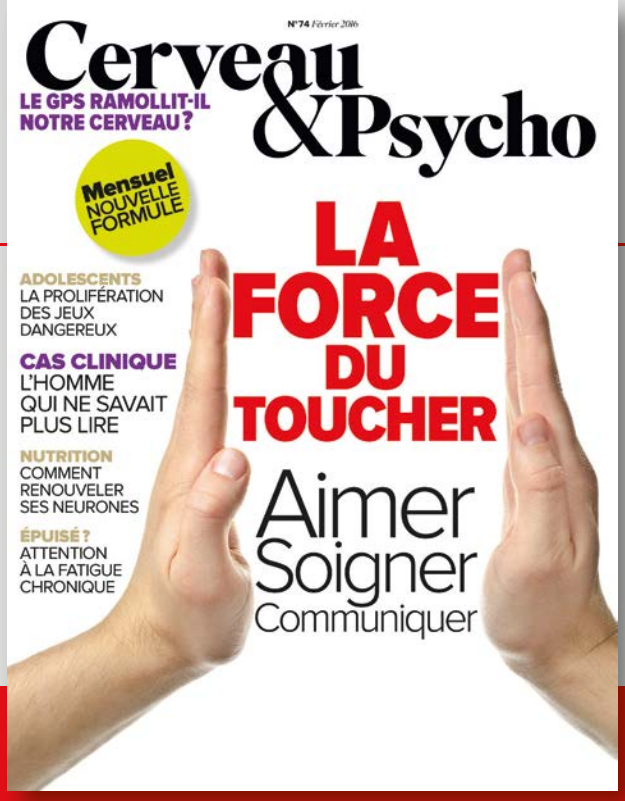
En décembre 2013, son équipe a publié les premières images en haute résolution de la structure du canal TRPV1 dans différents états. Ces informations devraient aider les chercheurs à bloquer le canal uniquement lorsqu'il prend une forme qui engendre la douleur.

Pourquoi un simple contact devient douloureux

Les travaux sur les canaux ioniques ont aidé à expliquer l'hypersensibilité aux stimuli douloureux. Mais la douleur neuropathique ne se limite pas à ce symptôme. La plupart des personnes souffrant d'une telle pathologie ressentent trois formes de douleurs : une hypersensibilité aux stimuli douloureux, mais aussi une douleur spontanée venant de nulle part et une allodynie, c'est-à-dire la perception douloureuse d'un contact normalement indolore. Chez Jama Bond, par exemple, l'allodynie a transformé le contact avec l'eau de la douche en torture. Les neurobiologistes s'intéressent aussi à ces autres caractéristiques de la douleur neuropathique. Une autre ligne de recherche a ainsi permis de clarifier comment l'allodynie survient.

En temps normal, les signaux de douleur et les signaux de contact non douloureux empruntent des voies séparées entre les nerfs de la peau et la moelle épinière, puis le cerveau. Toutefois, dans le cas de l'allodynie, les signaux se croisent dans la moelle épinière : des neurones intervenant dans la détection d'un contact activent la voie de la douleur.

Les principaux résultats ont émané de trois sources : des neurobiologistes au Japon et deux groupes au Canada – l'équipe d'Yves De Koninck, de l'Institut universitaire en santé mentale de Québec et celle de Michael Salter de l'Hôpital pour les enfants malades, à Toronto. Au cours d'études chez l'animal, les neurobiologistes ont montré qu'en réponse à une lésion nerveuse, la microglie – une population de macrophages



LA FORCE DU TOUCHER

Aimer, soigner, communiquer

Savez-vous que vous augmentez vos chances de persuader quelqu'un en touchant son avant-bras ? Que les caresses diminuent la douleur et la solitude ? Que des scientifiques ont évalué l'impact des massages sur notre peur et notre anxiété ? Tout cela grâce à des fibres nerveuses qui relient chaque parcelle de notre peau à notre cerveau. Le toucher pourrait bien être celui de nos cinq sens qui nous connecte le plus directement à nos semblables. Découvrez-en les secrets dans ce numéro pour être plus proche des autres.

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

L'action de la morphine sans ses effets indésirables

Les canaux à sodium ne sont pas les seuls canaux ioniques qui pourraient conduire à de nouveaux analgésiques. Le canal à potassium TREK-1, qui joue un rôle important [illegible] physiopathologie de la douleur, est une autre cible intéressante.

Majoritairement produit dans le système nerveux central, il est aussi présent dans le système nerveux périphérique, dans les nerfs nociceptifs (sensibles à la douleur), au niveau des ganglions rachidiens de la racine dorsale. Des mécanismes d'activation (ouverture du canal) et de désactivation (fermeture) très rapides lui permettent de maintenir proche de l'équilibre le potentiel membranaire du neurone, ce qui réduit l'excitabilité du neurone.

TREK-1 est sensible à divers stimuli. Il détecte la chaleur et le froid à des degrés douloureux et est activé par une augmentation de l'acidité intracellulaire. Il agirait aussi comme capteur de stimuli mécaniques dans certaines fibres nerveuses nociceptives (les fibres C). Enfin, il est impliqué dans la sensibilisation périphérique des nocicepteurs au cours de l'inflammation et son rôle dans la douleur neuropathique a aussi été envisagé.

En 2013, l'équipe d'Alain Eschalier, de l'université d'Auvergne à Clermont-Ferrand, a montré chez la souris que l'action analgésique de la morphine est liée au canal TREK-1 et a décrypté les mécanismes cellulaires qui relient ces deux molécules.

L'activité du canal TREK-1 est inhibée lorsqu'il est phosphorylé, c'est-à-dire habillé d'un groupe phosphate. En se fixant sur son récepteur à la surface des cellules nerveuses, la morphine inhibe une voie enzymatique (la voie de l'adénylate cyclase) qui, en temps normal, conduit entre autres à la phosphorylation de TREK-1. Cela diminue la phosphorylation du canal, ce qui augmente son activité. Le canal s'ouvre et les ions potassium sortent des cellules. Celles-ci deviennent alors hyperpolarisées, c'est-à-dire peu excitables, contribuant à l'effet analgésique de la morphine.

Le canal TREK-1 intervient donc en aval du récepteur de la morphine. Dès lors, son activation directe constitue une piste intéressante pour concevoir des molécules analgésiques qui pourraient produire une action puissante comparable à celle de la morphine, mais dénuée de ses effets indésirables (constipation, dépression respiratoire, dépendance). En effet, il a été montré que les effets secondaires de la morphine passent par une voie de signalisation indépendante de TREK-1. Il est donc possible de dissocier action analgésique et effets indésirables en agissant directement en aval des récepteurs de la morphine, sur le canal TREK-1.

En 2014, l'équipe d'Alain Eschalier, en association avec des chimistes de Clermont-Ferrand, a identifié des molécules susceptibles d'activer les canaux TREK-1. Ces molécules présentent une activité analgésique sur plusieurs modèles animaux de douleur *in vivo*. Brevetées, elles font l'objet d'un développement en vue d'essais cliniques.

– Bernard Calvino
professeur honoraire de neurophysiologie, Paris

constituant la principale défense immunitaire du système nerveux – émet un signal. Ce signal commande aux neurones de la moelle épinière de réduire la production d'une protéine, KCC2. Or la protéine KCC2 est un transporteur d'ions. Ancrée dans la membrane des cellules, elle maintient le subtil équilibre des ions chlorure entre l'intérieur et l'extérieur des cellules en transportant des ions chlorure et des ions potassium à travers la membrane.

Dans des conditions normales, de petites cellules nerveuses de la moelle épinière – les interneurones – régulent la communication entre les voies de signalisation des sensations douloureuses et des contacts indolores. Les interneurones empêchent un contact ordinaire d'être douloureux, mais permettent à un massage apaisant de soulager temporairement la douleur. Cependant, lorsque les neurones de la moelle épinière perdent la protéine KCC2, la communication se brouille et un contact léger suffit à déclencher la douleur. Les chercheurs pensent que si la concentration de KCC2 était rétablie à la surface des neurones, l'émission du signal inapproprié s'arrêterait.

En novembre 2013, Yves De Koninck et ses collègues ont annoncé la découverte d'un composé qui renforce le transport des ions chlorure *via* KCC2. La molécule rétablit l'équilibre des ions chlorure et la fonction électrique dans des neurones de la moelle épinière. De plus, elle atténue les signes de douleur neuropathique chez des rats. Enfin, elle est sans danger et exempte d'effets indésirables chez les animaux, même à fortes doses. Contrairement à d'autres médicaments qui inhibent en masse les canaux ioniques, cet agent pourrait n'agir que sur les cellules présentant un défaut, selon Yves De Koninck. Les cellules portant une protéine KCC2 fonctionnelle continueraient à se comporter normalement et le médicament ne les rendrait pas hyperactives.

Jusqu'ici, les travaux n'ont été menés que chez l'animal, mais certains aspects du transporteur KCC2 en font une cible intéressante pour des traitements chez l'homme. Les expériences indiquent qu'au lieu de modifier le comportement de KCC2, la molécule d'Yves De Koninck escorte davantage de transporteurs vers la surface de la cellule. Une étape cruciale pour le développement d'analgésiques sûrs et efficaces sera franchie lorsque l'on aura acquis une compréhension plus complète des mécanismes qui contrôlent le trafic des protéines KCC2.

Vers un traitement personnalisé ?

La plupart des chercheurs pensent que la médecine de demain sera personnalisée, c'est-à-dire que les gènes d'un individu et ses sensibilités aux médicaments détermineront quels seront le meilleur traitement et la manière la plus sûre de prévenir les maladies. Concernant la douleur chronique, cet avenir commence à peine à être envisagé. On est encore loin de pouvoir expliquer à chaque patient son problème

spécifique et d'y apporter une solution. Le traitement, même dans les meilleurs centres de prise en charge de la douleur, relève plus du tâtonnement.

Toutefois, les patients porteurs de mutations génétiques rares touchant les canaux Na_V montrent la voie. Par exemple, la plupart des personnes souffrant des sensations de brûlure des membres de l'érythromélalgie en raison d'une mutation héréditaire du canal à sodium $Na_V1.7$ ne sont pas soulagées par la carbamazépine, un antiépileptique parfois utilisé pour traiter la douleur. Mais on a découvert qu'une famille touchée par la maladie porte une mutation particulière sur le gène du canal qui entraîne une bonne réponse au médicament. En étudiant la structure moléculaire et la fonction du canal muté chez cette famille, Stephen Waxman et Sulayman Dib-Hajj ont compris comment la carbamazépine calmait l'hyperactivité du canal muté et ont ensuite pu prédire avec précision que la molécule fonctionnerait aussi pour une autre mutation. Ces résultats sont intéressants, déclare Stephen Waxman, car ils suggèrent que fonder le traitement d'une personne sur sa constitution génétique n'est pas irréaliste pour les patients atteints d'une érythromélalgie héréditaire et pour ceux souffrant de maladies douloureuses plus communes.

Les symptômes de Jama Bond ont subitement disparu juste avant qu'elle mette au monde un petit garçon en bonne santé. Étonnamment, les injections *in utero* de stéroïdes destinées à faciliter la maturation des poumons de l'enfant ont eu un effet bénéfique sur la mère. « Je me suis réveillée au milieu de la nuit et mes pieds ne souffraient pas, ce qui n'était pas arrivé depuis plus de six mois », se rappelle-t-elle. Personne n'a pu expliquer pourquoi. Les symptômes sont réapparus, mais jamais avec la même gravité. « Une station debout prolongée a un effet direct : j'ai mal », explique Jama Bond. « Mais je gère la douleur et ne prends pas de médicaments, ce qui est déjà incroyable. J'aimerais être guérie. » Et les neurobiologistes de la douleur aimeraient soulager les millions de personnes comme elle. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. G. Waxman et G. W. Zamponi, **Regulating excitability of peripheral afferents : emerging ion channel targets,** *Nature Neuroscience*, vol. 17, pp. 153-163, 2014.

Comment soulager la douleur, *L'Essentiel Cerveau&Psycho*, n° 12, février-avril 2014.

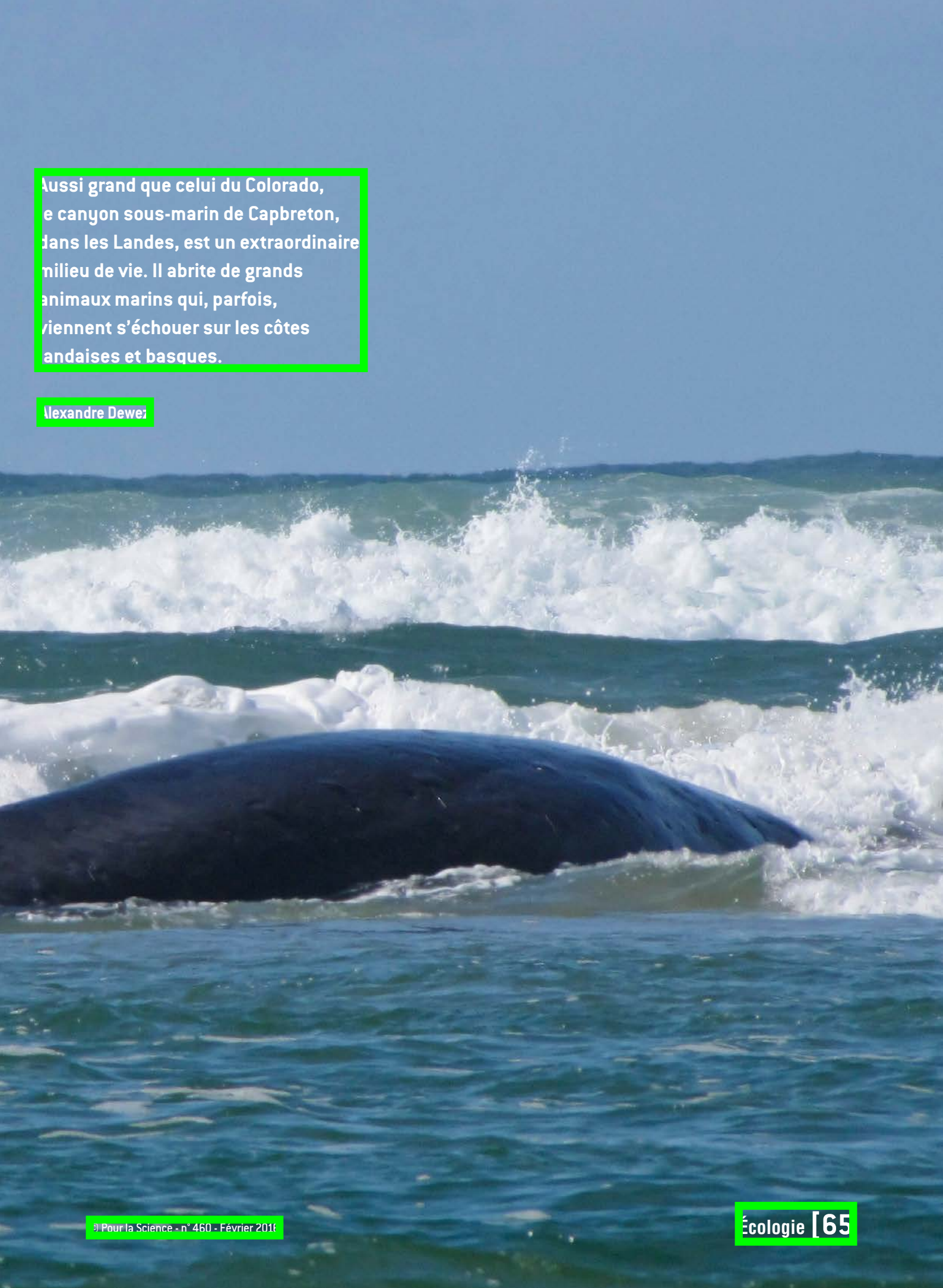
M. Devilliers *et al.*, **Activation of TREK-1 by morphine results in analgesia without adverse side effects,** *Nature Communications*, 4:2941, doi: 10.1038/ncomms3941, 2013.

D. Fields, **Douleur chronique : les nouveaux coupables,** *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.

Les étonnants prédateurs marins du gouf de Capbreton

Aussi grand que celui du Colorado, le canyon sous-marin de Capbreton, dans les Landes, est un extraordinaire milieu de vie. Il abrite de grands animaux marins qui, parfois, viennent s'échouer sur les côtes landaises et basques.

Alexandre Dewez



Balaenoptera Kolpatueta : on l'appelait « grand poisson des mers », « grand tyran des mers ». Poursuivi des siècles durant par une chasse intensive, il a disparu de nos côtes. C'était la baleine franche *Eubalaena glacialis*, la « baleine des Basques », qui passait dans le golfe de Gascogne près du gouf de Capbreton au cours de ses migrations annuelles.

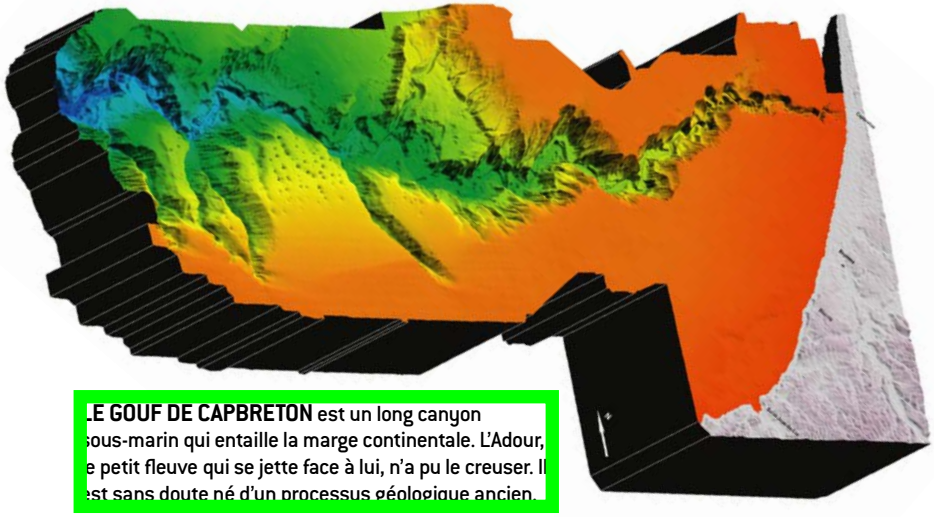
Gouf ? Un cap breton dans les Landes ? L'endroit, qui s'appelait *Cap Bertou* au XII^e siècle, n'a rien de breton et tout de gascon. Quant à *gouf*, qui signifie « gouffre » en gascon, c'est le nom donné en géologie à un canyon sous-marin entaillant une marge continentale. Il provient justement du gouf de Capbreton, un canyon s'ouvrant à l'embouchure de l'Adour, à quelques centaines de mètres des plages de Capbreton et d'Hossegor, où le cordon dunaire des Landes finit sa course peu avant que la côte rocheuse basque ne s'oriente vers l'ouest. Cette curieuse structure géologique amène en quelque sorte les phénomènes de l'océan profond jusque sur la côte.

Un monde sous-marin encore mal compris

C'est à ces phénomènes que nous nous intéresserons ici, et plus spécifiquement à la macrofaune, dont la baleine basque n'est qu'une manifestation passée. En particulier, nous verrons que la biosurveillance des populations marines révèle d'une part une très riche faune illustrant la biodiversité extraordinaire du gouf, d'autre part la présence d'un nombre croissant d'espèces de milieux subtropicaux, ce qui suggère une lente évolution du milieu.

L'ESSENTIEL

- Le gouf de Capbreton est un long canyon sous-marin commençant en face de la ville gasconne de Capbreton.
- Sa structure géologique en a fait le siège d'une énorme production biologique.
- Celle-ci se mesure à l'aune de l'importante macrofaune qui vit dans le gouf, notamment de nombreuses espèces de Cétacés.
- L'étude de cette faune met en évidence une lente évolution vers un milieu ressemblant à une mer chaude.



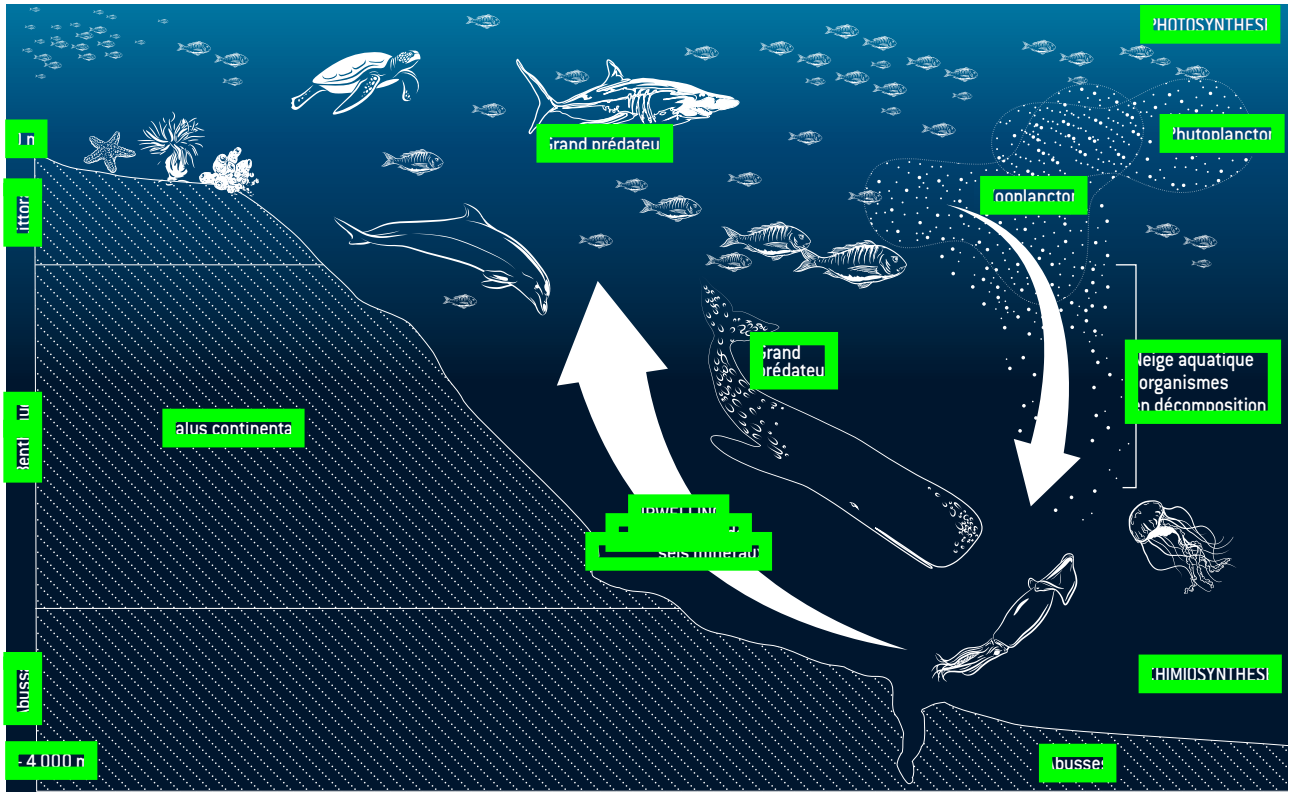
LE GOUF DE CAPBRETON est un long canyon sous-marin qui entaille la marge continentale. L'Adour, le petit fleuve qui se jette face à lui, n'a pu le creuser. Il est sans doute né d'un processus géologique ancien.

L'importance de la macrofaune traduit toujours la richesse biologique d'un milieu, puisqu'il faut bien que celui-ci lui fournisse de quoi vivre ! Or depuis plus de trente ans, le Groupe d'étude de la faune marine atlantique (Gefma) étudie depuis Capbreton les prédateurs supérieurs marins – ceux qui occupent le haut de la chaîne alimentaire. En effet, quelque 35 % des échouages de mammifères marins et de tortues de mer qui ont lieu en France se produisent entre Garonne et Espagne ! Les données que le Gefma a rassemblées depuis ses débuts par ses observations lors des échouages de gros animaux marins et avec l'aide des marins-pêcheurs, donnent une mesure de la biodiversité du gouf et des dangers qu'affrontent les espèces sauvages, dont beaucoup sont d'origine humaine.

La richesse biologique du gouf de Capbreton est avant tout une conséquence de sa structure géologique. De la taille de celui du Colorado, long de 270 kilomètres, ce canyon descend très vite à plus de 1 000 mètres et atteint la profondeur de la plaine abyssale du golfe de Gascogne, c'est-à-dire 4 000 mètres. Contrairement à la plupart des canyons, il est flanqué de petites ravines sans affluents importants. Ses flancs sont bordés de pentes abruptes marquées par des traces d'avalanches creusées dans les sédiments de la marge continentale gasconne et cantabrique (*voir la figure ci-contre*).

L'Adour, un petit fleuve, débouche à Capbreton juste en face de la tête de ce canyon. A-t-il pu créer le gouf ? Sans doute pas : même en plusieurs dizaines de millions d'années, ce cours d'eau ne semble pas avoir été en mesure d'entailler la marge continentale sur plusieurs centaines de kilomètres. Il est plus vraisemblable que l'imposante structure actuelle soit l'héritage d'un grand cours d'eau du passé. Cet imposant paléo-Adour existait sans doute il y a quelque 80 millions d'années, lorsque de lents et puissants mouvements tectoniques ont redessiné la région en poussant la plaque hispanique contre la France.

Quoi qu'il en ait été, le gouf est aujourd'hui une puissante entaille dans le plateau continental, qui s'évase en une vallée méandriforme perpendiculairement au littoral landais et atteint les abysses. Sa présence près du littoral a pour effet de calmer la mer, la houle étant moins forte en eau profonde ; elle a aussi pour effet de produire sur la côte de très grandes vagues,



qui résultent de l'arrivée sans entrave de la houle océanique sur la toute dernière marge sableuse.

En profondeur, le gouf contient un système de courants influencé par la circulation de masses d'eau cycloniques (chaudes) et anticycloniques (froides) à travers les plaines abyssales et par la naissance de tourbillons dans la couche superficielle (certains d'un diamètre de 100 kilomètres). Ces courants superficiels ou profonds favorisent l'apparition d'upwellings, c'est-à-dire de remontées de minéraux accompagnées de pluies de particules organiques et autres cadavres, propices à la multiplication des microorganismes qui constituent la base de la chaîne alimentaire marine *(voir la figure ci-dessus)*.

Un intense processus de production primaire

Cet intense processus biologique de production primaire explique que la couche superficielle surmontant le gouf soit si riche en nutriments. Depuis les grandes profondeurs jusqu'à la surface, en passant par tous les flancs des ramifications du gouf, une intense vie s'épanouit, en particulier, une macrofaune très diverse. Plus de trois cents espèces de grands organismes marins ont en effet été répertoriées dans cette oasis marine, dont de très nombreux prédateurs situés tout en haut de la chaîne alimentaire. Ainsi, on y a recensé pas moins de trente espèces de requins et de raies, six espèces de tortues de mer et une trentaine d'espèces de mammifères marins.

Afin d'en prendre toute la mesure de la richesse extraordinaire de ce milieu, passons en revue le bestiaire que nos observations quotidiennes nous ont permis d'étudier, auquel il faut ajouter la seule espèce que nous n'avons pu observer directement : la « baleine des Basques », puisqu'elle a malheureusement disparu du gouf.

Cette baleine, évoquée au début de cet article, tient son ancien nom scientifique *Eubalaena biscayensis* comme son nom français « baleine de Biscaye » des côtes basques. Toutefois, pratiquement disparue de toute la façade atlantique depuis le XVI[e] siècle, ce grand cétacé est aujourd'hui désigné sous le nom d'*Eubalaena glacialis*. Les Basques, qui l'appelaient *sardako balea* (« baleine grégaire »), ont longtemps exploité cette baleine à la nage lente, au comportement doux et grégaire, donc facile à harponner. L'animal était d'autant plus intéressant que les 40 % de graisses légères que contient son corps le faisaient flotter. Une fois mort, il pouvait donc être facilement traîné à flanc de navire

LA CHAINE ALIMENTAIRE

marine du gouf de Capbreton résulte des mouvements d'eau créés par de forts vents de surface. Cet effet entraîne une remontée des eaux profondes, un upwelling, qui s'accompagne d'une très forte production biologique. Tous les étages de la chaîne alimentaire y participent.

L'AUTEUR

Alexandre DEWEZ, biologiste, est président du Groupe d'étude de la faune marine atlantique (Gefma). Il est aussi l'un des consultants de l'Accobams (Accord sur la conservation des Cétacés de la mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente).

pour être amené dans l'une des stations côtières du Pays basque, où l'on effectuait son dépeçage au son du tambourin, de la flûte et autres instruments. « Tout est bon dans la baleine », disait-on : sa graisse, qui fournissait une huile de qualité, ses os, les fanons souples et longs avec lesquels on fabriquait corsets, porte-plumes, peignes et autres objets, etc.

Heureusement, toutes les baleines n'ont pas disparu du gouf de Capbreton : quatre espèces de Cétacés à fanons – des Mysticètes – et seize espèces de Cétacés à dents – des Odontocètes – y vivent et s'y reproduisent. S'ils ne sont plus chassés, ils doivent cohabiter avec les humains, sans parler des dangers naturels qui les menacent. C'est pourquoi certains de ces grands animaux s'échouent sur la plage. Ces échouages insolites peuvent concerner tant de très grandes espèces, telle la baleine à bosse *Megaptera novæangliæ* (jusqu'à 16 mètres de long), que des petits cétacés, tel le marsouin commun *Phocœna phocœna* (jusqu'à 2 mètres).

Il nous arrive de découvrir des cétacés échoués en groupe, par exemple des cachalots *Physeter macrocephalus*, des baleines à bec *(Ziphius cavirostris)*, des mésoplodons *(Mesoplodon densirostris, europæus, de Sowerby…)*, ou encore des kogiidés, tel le cachalot pygmée *Kogia breviceps* ou nain *Kogia simus*. Quand les sapeurs-pompiers ou la police municipale nous préviennent d'un échouage, nous nous rendons sur place pour identifier l'espèce et procéder à des prélèvements d'organes à des fins d'analyse. Quand l'animal vient de s'échouer, nous l'autopsions pour déterminer l'état physiologique au moment de la mort et, si possible, les causes de l'échouage.

Les situations que nous rencontrons ne sont pas toujours claires. Certains échouages, tel celui de trois cachalots juvéniles mâles longs de 12 mètres, en 2002, témoignent de comportements aléatoires difficiles à expliquer. Connus sous le nom d'espèce *Physeter macrocephalus*, ces grands cachalots, parfois appelés cachalots macrocéphales (« à grande tête ») sont présents dans toutes les mers. Il n'est donc pas étonnant qu'il y en ait dans

Quatre espèces de Cétacés à fanons et seize espèces de Cétacés à dents vivent dans le gouf

le gouf de Capbreton, où ils peuvent se nourrir de céphalopodes, parmi lesquels le fameux calmar géant *(Architeutis dux)*.

S'ils ne s'étaient échoués, ces trois mâles juvéniles auraient pu atteindre 17 mètres de long (cette taille fait des cachalots l'une des plus grandes espèces carnassières au monde). Deux des jeunes cachalots étaient encore vivants. L'autopsie de celui qui était mort a révélé la présence dans son estomac d'une bouteille en plastique et de nombreux vers parasites, des nématodes *(Anisakis simplex)*. Il semble ainsi que les deux cachalots échoués vivants aient, dans un esprit grégaire, accompagné un congénère malade jusqu'à la côte vers laquelle il dérivait, peut-être déjà sans vie. Le faible coefficient de marée ne leur aura pas permis de regagner le large, de sorte qu'ils ont été pris au piège. Ce témoignage touchant des liens entre cachalots a placé les sauveteurs dans une situation de totale impuissance, car, même avec des grues, il aurait été impossible de remettre à l'eau ces masses de 12 tonnes déjà bien enfoncées dans le sable.

Les échouages concernent aussi bon nombre de petits cétacés, et tout particulièrement le dauphin commun *Delphinus delphis*. Parmi les cas exceptionnels, nous sommes intervenus à Tarnos en 1999 sur une baleine à bec de Blainville *(Mesoplodon densirostris)*. Connu pour sa manière caractéristique de pointer son bec hors de l'eau quand il respire, ce cétacé vit en groupe de cinq à sept individus. Lui aussi se nourrit largement de calmars. Sa présence dans le gouf est intéressante en ce sens qu'il s'agit d'une baleine répandue plutôt dans les milieux subtropicaux.

Tout aussi remarquable est l'échouage en novembre 2014 sur une plage de la commune d'Ondres (Landes) d'une baleine à bec de Gervais, *Mesoplodon europæus*, une espèce rare des eaux atlantiques tropicales à tempérées ; ou encore, en mai 2012, celui d'une baleine à bec de Cuvier *(Ziphius cavirostris)* encore immature.

Un autre cas nous a frappés : l'échouage sur la plage de Soustons, dans les Landes, d'un individu de l'espèce insolite qu'est le cachalot pygmée *(Kogia breviceps)*. Ce cachalot occasionnellement sauteur a tout

UN GLOBICEPHALE TROPICAL s'est échoué avec un compagnon en 2008 à Saint-Jean-de-Luz *(a)*. En décembre 2015, deux requins-marteaux ont été accidentellement pêchés par *Le Yéti,* un bateau de pêche d'Arcachon *(b)*. Un cachalot pygmée s'est échoué à Hendaye en 2006 *(c)*. Quant au dauphin commun échoué en novembre 2014 près de Capbreton *(d)*, il présentait des nécroses sévères de la face, sans doute dues à un poxvirus ou à un morbillivirus, deux types de virus transmissibles à l'homme.

Au-dessus du Gouf, toute une vie à affinités méditerranéennes

Dans son article, Alexandre Dewez décrit les observations du Groupe d'étude de la faune marine atlantique (Gefma) sur les échouages de grands animaux [illegible] les affinités méridionales et tropicales de cette macrofaune. Or ce phénomène concerne plus largement la faune et la flore du sud du golfe de Gascogne.

Au XIXe siècle, le marquis de Folin (1817-1896) fut parmi les premiers océanographes à remarquer les affinités méridionales de nombre d'espèces du sud du golfe de Gascogne. Ses observations furent publiées en 1903, dans son ouvrage *Pêches et chasses zoologiques,* consultable dans la bibliothèque numérique de l'Ifremer.

L'extraordinaire biodiversité du sud du golfe de Gascogne est due à sa configuration unique, à la croisée de milieux rocheux et sableux, côtiers et profonds à la fois. Quelques espèces très représentées suffisent au biologiste pour remarquer son caractère méridional. Citons par exemple les saupes (*Sarpa salpa*), cette espèce de poisson de la famille des sparidés, si emblématique de la Méditerranée. De fait, elle sera familière à tous ceux qui ont plongé dans cette mer, laquelle garde beaucoup de traits hérités de l'époque ancienne où elle était encore une mer tropicale. Citons encore l'oblade (*Oblada melanura*), une forme de dorade très commune en Méditerranée, qui l'est aussi dans les eaux du sud du golfe de Gascogne.

Cette affinité méditerranéenne se remarque aussi chez les invertébrés benthiques. Par exemple, la présence de *Marionia blainvillea* est remarquable, puisque ce gastéropode, qui est connu dans la mer de Nice, l'est aussi dans toute la Méditerranée occidentale ainsi que dans les eaux atlantiques adjacentes. Manifestement, il se plaît assez dans les eaux de la baie de Biscaye pour avoir pu les coloniser. Elles ne sont pourtant pas proches de la Méditerranée.

Actuellement, il est admis que la singularité méridionale, voire tropicale de la faune marine du sud du golfe de Gascogne présente un intérêt patrimonial particulier. C'est pourquoi il apparaît opportun de s'intéresser à l'évolution de ces espèces dans la baie de Biscaye pour évaluer des changements environnementaux qui pourraient s'opérer dans les années futures, dont le changement climatique. Remontent-elles vers le nord ? Sont-elles présentes en plus grand nombre d'individus ? Nombre d'espèces sont caractéristiques de cette zone géographique et la conservation de leurs habitats est un enjeu important pour que ce patrimoine biologique, unique sur la façade atlantique française, puisse perdurer.

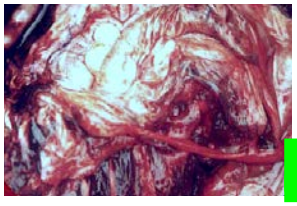
Depuis un siècle, de nombreuses publications nous ont fait connaître les espèces de cette région, notamment celles des chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle, à l'époque où cette institution disposait encore d'une antenne à Biarritz. Néanmoins, de nombreuses lacunes subsistent encore sur la connaissance des espèces marines présentes, aussi bien sur le littoral que dans le gouf.

LE GASTEROPODE *MARIONIA BLAINVILLEA* est un Mollusque *(ci-dessus un spécimen photographié dans un milieu tropical)* dont la livrée, de couleur variable, peut être par exemple marron kaki, jaune ou rouge vif, avec des taches blanches.

– Marie-Noëlle de Casamajor
Laboratoire ressources halieutiques d'Aquitaine, Ifremer, Anglet

Une femelle de dauphin gestante

Au cours des autopsies réalisées par l'auteur et ses collègues près des lieux d'échouage, il arrive de découvrir des cas de mises bas récentes. Ce fœtus de dauphin, par exemple, était contaminé par des nématodes, des vers parasitaires *(image du bas)*, qui s'étaient fixés sur le cordon ombilical. Ils ont certainement contribué à affaiblir une femelle gestante, qui s'est échouée juste avant son terme.



pour être confondu avec un requin, car il est doté de fausses ouïes derrière les yeux, c'est-à-dire une zone pigmentée faisant penser à des ouïes.

Chacun de ses échouages est une source d'étonnement. Sa taille, qui n'excède pas 3 mètres (entre 2,60 et 2,90 m), son évent unique décentré vers la gauche, son corps trapu, sa dorsale en forme de faucille (différente de celle du cachalot nain *Kogia simus*), ses nageoires pectorales très courtes et sa tête dotée d'une bouche minuscule armée de petites dents coniques et pointues disposées sur les mandibules inférieures… Tout est curieux chez ce cétacé qui fréquente le plateau continental proche des grands fonds en milieu tropical ou tempéré. Lui aussi chasse des calmars, mais aussi certains poissons ou crustacés. Le spécimen que nous avons autopsié venait de mettre bas. Nous avons constaté que sa mort a résulté de l'ingestion d'un ressort entouré de sacs de plastique, vraisemblablement jeté par-dessus bord par quelqu'un de peu scrupuleux.

Alors que nous étions en train de prélever les organes vitaux – tractus génital, gonades, glandes mammaires, etc. –, nous avons découvert une sorte de poche à encre longue d'une quarantaine de centimètres, une pièce anatomique propre aux Kogiidés. Les fonctions de cette poche qui prolonge le colon et se termine au niveau anal sont mal connues. Il semblerait que l'encre des céphalopodes ingérés par le cachalot soit stockée dans la poche en question. Cet organe serait activé lorsque le cétacé veut se dissimuler de prédateurs ou de certaines proies, et cela en profondeur, dans un univers quasi obscur… Étrange.

Outre ces échouages de baleines, le Gefma a effectué plus de 2000 interventions en vingt ans sur de nombreux delphinidés : dauphin commun *Delphinus delphis*, grand dauphin *Tursiops truncatus*, dauphin bleu et blanc *Stenella cœruleoalba)*, orques *(Orcinus orca)*, requins, tortues marines (tortues luth *Dermochelys coriacea*, verte *Chelonia midas*, imbriquée *Eretmochelys imbricata…)* et phoques. Ainsi, en 2006, nous avons découvert la présence de deux phoques juvéniles à capuchon *(Cystophora cristata)*, qui s'étaient échoués vivants mais très affaiblis dans l'Adour, au port de Peyrehorade. Transportés pour être soignés au musée de la Mer de Biarritz, ils n'ont pas survécu.

S'agissant des tortues, le Gefma a pu sauver des juvéniles d'espèces de tortues de caouane, de Kemp, verte, et imbriquée. Quand elles étaient vivantes, nous les avons dirigées vers le centre de La Rochelle, où elles ont été soignées avant d'être remises à l'eau au large des côtes atlantiques. L'une des espèces les plus emblématiques de tortue du gouf de Capbreton est la tortue luth *Dermochelys coriacea*, dont on sait qu'elle se nourrit de méduses, notamment de l'espèce *Rhizostoma pulmo*. Or plusieurs autopsies réalisées sur des femelles adultes mortes échouées ou capturées accidentellement ont montré l'ingestion de plastiques d'origines diverses, sans doute confondus avec des méduses. Elles nous ont aussi révélé la présence d'œufs en gestation qui auraient été pondus plusieurs mois plus tard, lors du retour des femelles adultes sur des plages de Guyane ou du Costa Rica.

Des espèces à affinités méridionales

Depuis quelques années, notre veille environnementale met par ailleurs en évidence la présence d'espèces ayant des affinités avec les mers chaudes, ou du moins méridionales. Outre la baleine à bec de Blainville, cette baleine tropicale que nous évoquions plus haut, des dorades coryphènes ont aussi été observées dans le gouf. Ces « dorades portant un casque » (selon l'étymologie grecque de *coryphène*) sont normalement tropicales, mais on les observe parfois en Méditerranée. Certes, les dorades coryphènes effectuent des migrations très longues, mais normalement dans les eaux chaudes de l'Atlantique, du Pacifique et de l'océan Indien. Alors que signifie leur présence dans le gouf de Capbreton ?

Un autre exemple est le baliste cabri *(Balistes capriscus)*, qui vit normalement en milieu récifal subtropical. Or les marins-pêcheurs en capturent régulièrement ; de même, les plongeurs en apnée ou en scaphandre autonome les observent dans les épaves ou près des ragues (cavités rocheuses sous-marines).

De même, le saint-pierre américain *Zenopsis conchifer*, qui était observé au sud de l'Europe dans les années 1960, vit désormais aussi dans le gouf. Tout récemment, la présence suspectée depuis longtemps du grand requin-marteau *Sphyrna mokarran*, typique des eaux tropicales, a été confirmée par la pêche accidentelle

- regrettable, l'espèce étant menacée – de deux exemplaires juvéniles *(voir la figure b page 68)*.

Tout aussi étonnante est l'observation en 2003 d'un marlin *Makaira nigricans* de 380 kilogrammes au large de Capbreton, un type de poisson qui écume les mers chaudes. Plus normale peut-être est la présence du rorqual boréal *Balaenoptera borealis* ou encore celle du poisson-lune *Mola mola*, un poisson osseux des eaux tropicales et tempérées.

Face à ce tableau contrasté, on s'interroge. Le gouf est-il en train de se tropicaliser ? Cette évolution apparente résulte-t-elle d'un lent réchauffement des eaux ou ne reflète-t-elle que notre profonde incompréhension de l'écologie de ce milieu ? Il semble qu'un réchauffement des eaux marines soit bien en cours dans le golfe de Gascogne. Jean-Claude Quéro, biologiste marin à l'Ifremer, avait déjà souligné la hausse de la température de fond du gouf, qu'il estimait à environ 2 °C depuis les années 1970.

Pour leur part, Frédéric Vandermeirsch, de l'Ifremer à Plouzané, et des collègues ont construit un modèle physique du golfe de Gascogne à partir des mesures de température et de salinité effectuées pendant 30 ans. Lors d'un colloque en 2005, ils ont fait savoir que d'après leurs calculs, la température moyenne des eaux de cet océan avait augmenté de 1,5 °C en surface au-dessus du plateau continental et de 1 °C au-dessus de la plaine abyssale ; à ces évolutions correspondent respectivement des hausses de la température moyenne de 0,8 °C et de 0,6 °C dans la tranche d'eau des 50 premiers mètres au-dessus du plateau continental et de la plaine abyssale.

Ainsi, la lente remontée d'espèces méridionales et tropicales dont témoigne la macrofaune du gouf de Capbreton semble liée au réchauffement des eaux du golfe de Gascogne. Pour préciser le phénomène et affiner les inventaires de la faune, l'étude systématique des échouages de mammifères marins et la collaboration avec les autres experts de la mer que sont les marins-pêcheurs sont à poursuivre. Ce gouf est un monde mystérieux qui ne nous a pas encore tout dit. ■

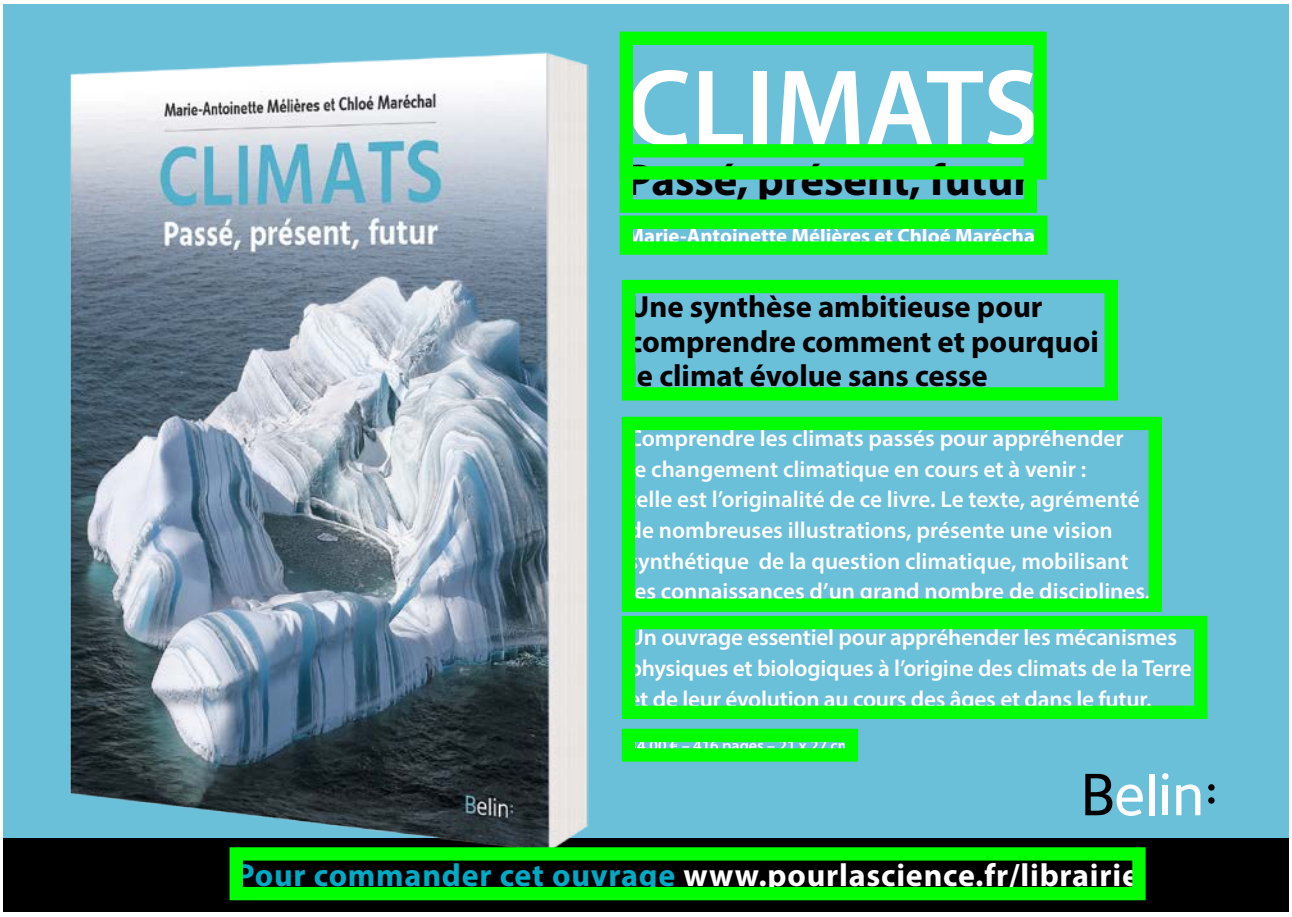
BIBLIOGRAPHIE

M.-N. de Casamajor *et al.*, **Espèces inhabituelles capturées dans le sud du golfe de Gascogne. Synthèse 1997-2012**, 2013 (http://archimer.ifremer.fr/doc/00112/22830/).

M.-N. de Casamajor, **Baie de Biscaye, richesse méconnue et diversité**, Éditions Alexandre Dewez, 2004.

P. Cirac *et al.*, **Le canyon de Capbreton : nouvelles approches morphostructurales et morphosédimentaires. Premiers résultats de la campagne Itsas**, *C. R. Acad. Sci. Paris série IIa*, vol. 332, pp. 447-455, 2001.

J.-F. Bourillet, *et al.*, **Le canyon de Capbreton. Cartes morpho-bathumétriques**, Ouae, 2007.



L'histoire de l'encre

Souvent associée à l'espionnage international, l'encre sympathique a aussi eu un âge d'or oublié en tant que magie de scène et démonstration de science.

Kristie Macrakis

Pour beaucoup, les mots « encre invisible » évoquent des images de jeux d'enfants avec du jus de citron et une bougie, ou des messages d'espions pendant la guerre. De fait, l'écriture secrète a longtemps fait partie à la fois des jeux de magie et des intrigues internationales. Mais elle a aussi une longue histoire riche et méconnue. Son récit commence avec la découverte d'une encre apparaissant et disparaissant mystérieusement et culmine à la fin du siècle des Lumières. Durant cette période de fermentation intellectuelle, le développement de la magie de scène a coïncidé avec un renouveau de la magie naturelle – une tradition occulte qui recherchait le pouvoir des sources naturelles, telles que les plantes ou les astres – et une demande croissante de démonstrations scientifiques publiques. C'est sur ce fond de bouillon de sorcière que l'encre invisible a fleuri.

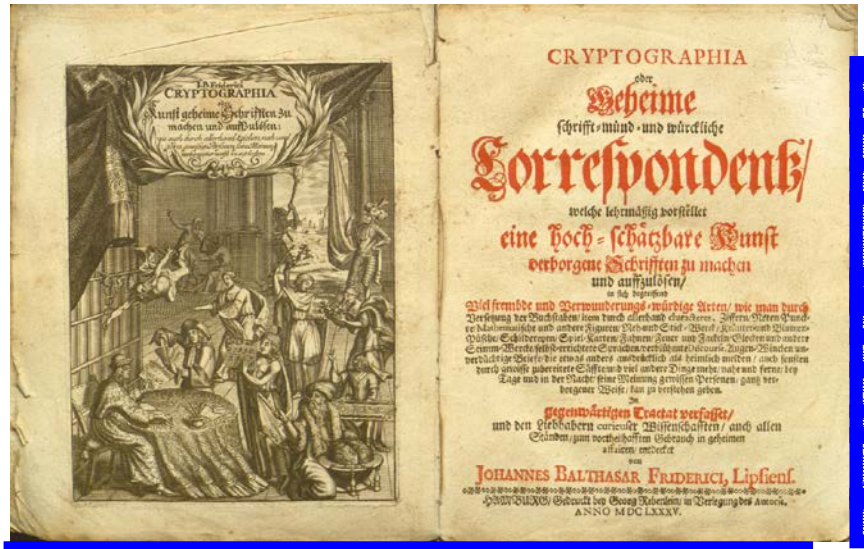
Depuis des années, l'histoire de l'encre invisible me fascine. Aussi, lorsque, il y a quelques années, j'ai eu l'occasion de visiter Schneeberg, en Allemagne, j'étais tout excitée. Schneeberg est l'un des berceaux de l'encre invisible. Situées dans la chaîne des monts Métallifères de la Saxe, les montagnes de Schneeberg contenaient à l'époque de riches gisements d'argent, de bismuth et de cobalt, cachés sous de verdoyantes collines et vallées. Jusqu'au XVI[e] siècle, Schneeberg était connue comme une ville minière d'argent, mais quand les exploitants eurent épuisé les veines connues de ce métal, ils s'intéressèrent au cobalt, dont la demande était grande pour colorer le verre et d'autres produits.

discrète invisible

À LA CHALEUR, le crapaud géant se métamorphose en samouraï. Même si l'usage moderne de l'encre invisible est venu d'Europe, d'autres cultures se sont délectées de ses propriétés, comme le montre cette estampe japonaise de la période Edo (1603-1897).

L'ESSENTIEL

- Au XVI[e] siècle, les recettes d'encres invisibles faisaient partie de la littérature des secrets, au même titre que l'alchimie et la médecine par les plantes.
- La découverte des propriétés du cobalt minéral, qui, en solution, change de couleur à la chaleur, a lancé les savants des Lumières sur l'étude de l'encre au cobalt.
- Popularisée par des spectacles de magie scientifique et des cabinets de chimie portatifs, elle devint un outil de choix pour faire découvrir la magie de la chimie.



DES INSTRUCTIONS VARIÉES pour préparer et utiliser de l'encre invisible étaient parfois proposées dans des recueils du XVII[e] siècle, tel ce traité de cryptographie de Johannes Balthasar Friderici, publié en Allemagne en 1684.

Les mineurs ont extrait des centaines de tonnes de cobalt de la montagne. Et si l'exploitation de l'argent apporta la richesse à la ville, le cobalt produisit des merveilles bien plus exotiques – dont l'encre invisible.

Le XVI[e] siècle était l'âge d'or de la littérature des secrets, des recueils rassemblant des recettes concernant la métallurgie, la teinture, la fabrication de pigments, l'alchimie, la médecine par les plantes, la magie, la cuisine, la cosmétologie… Parfois, ces livres contenaient des pistes pour créer de l'encre invisible, écrites comme une recette de cuisine, avec des ingrédients simples et accessibles. Par exemple, une recette suggérait de plonger dans l'eau une lettre écrite à l'alun (un sel minéral), ce qui ferait virer les écrits du blanc au noir ; une autre conseillait de frotter de la poudre sur du lait de figuier pour le rendre visible. D'autres encore disaient de peindre, éponger ou étaler un liquide sur la lettre secrète, de l'agiter dans l'air ou de la plonger dans l'eau, selon la nature de l'encre utilisée.

Le cobalt donna un nouvel élan à l'encre invisible. En 1705, une mystérieuse alchimiste allemande semble avoir été la première personne à identifier l'alliage de cobalt et de bismuth comme une substance précieuse pour fabriquer de l'encre invisible. Cette alchimiste fut aussi l'auteure anonyme de trois ouvrages, dont *Schlüssel zu dem Cabinet der geheimen Schatz-Kammer der Natur* (« La clé du cabinet de la chambre du trésor secret de la nature »), qui incluait une discussion sur la modification des couleurs de l'alliage. Trois initiales, DJW, sont les seules informations disponibles sur leur auteur, mais des recherches suggèrent qu'il s'agissait d'une certaine Dorothea Juliana Walchin (ou Wallich ou Wallichin), dont on ne sait pas grand-chose.

Cette obscure alchimiste aurait découvert du cobalt minéral qui apparaît rouge en solution et que l'on supposait être la matière première à partir de laquelle tous les autres éléments étaient constitués – le graal des alchimistes. Le cobalt minéral avait aussi de remarquables qualités visuelles : à la chaleur, sa couleur changeait du rosé au vert tendre et au bleu ciel. Quand le cobalt était préparé sous la forme d'une solution utilisable pour écrire, sa teinte était claire, mais il produisait une belle couleur bleu-vert quand il était chauffé. Les écrits disparaissaient quand ils étaient refroidis.

L'encre de cobalt de Jean Hellot

Pour Jean Hellot, un chimiste français qui, durant le XVIII[e] siècle, s'investit plus que tout autre dans les recherches sur l'encre invisible et sa promotion, on devait la découverte des qualités magiques du cobalt à une autre personne – un artiste allemand, lui aussi de nom inconnu. Durant l'été 1736, l'artiste anonyme montra à des membres de l'Académie royale des sciences, à Paris, la magie du cobalt. Il avait grimpé sur les montagnes de la Saxe à la recherche d'un gisement, qu'il avait nommé *Minera Marchassitae*. Les curieuses propriétés du minerai extrait, contenant du bismuth, du cobalt, du fer et d'autres minéraux, enchantèrent Hellot, qui l'expérimenta avec assiduité pendant son temps libre. À la fin de l'été, il avait écrit un article sur l'encre de cobalt pour le journal de l'Académie.

Peu après la publication de l'article, des savants allemands protestèrent. Hellot avait été salué pour la découverte de cette substance, alors que, clamaient-ils, un certain professeur Teichmeyer, de Jena, avait montré la même encre de cobalt à ses étudiants six ans plus tôt. Bien sûr, il y avait aussi cette mystérieuse femme allemande, qui avait décrit des activités similaires en 1705. La fierté nationaliste ajouta à cette querelle de priorité. Les Allemands s'irritèrent quand l'encre de cobalt devint connue sous le nom d'« encre sympathique de Hellot », un honneur qui impliquait que la découverte était française. (Les

LE CHLORURE DE COBALT passe du bleu au rose quand il est mouillé. Cette réaction était utilisée au XIX[e] siècle dans des poupées dites (à tort) barométriques. Leur robe, bleue par temps sec, devenait rose quand l'humidité augmentait, indiquant un risque de pluie.

expérimentateurs de l'époque décrivaient les encres, spécialement celles constituées de multiples substances, comme fonctionnant par « sympathie ». Peu à peu, le terme encre sympathique était devenu un synonyme de l'encre invisible.)

On sait aujourd'hui que dès la seconde moitié du XVII[e] siècle, un savant italien, Giambattista della Porta, avait écrit sur l'encre invisible. Il avait observé que certaines encres se développent à la chaleur, d'autres sous l'application de « matière glutineuse », et d'autres encore sous l'application d'une « liqueur » qui ne fonctionne qu'associée à un certain produit chimique. Cette liqueur qui nécessitait un révélateur spécifique – un réactif – était le plus sûr des procédés. Robert Boyle, le père de la chimie moderne, l'utilisait pour consigner ses secrets à la fin du XVII[e] siècle.

Hellot développa un système complet de classification des trois types de révélateurs communs décrits par della Porta. Il lui ajouta deux nouvelles classes de son cru. Dans la première, l'air révélait certains colorants ; la seconde rassemblait des encres qui apparaissaient et disparaissaient spontanément. Le point commun de toutes les anciennes techniques de révélation était qu'une fois la réaction produite, les écrits restaient visibles même quand on les refroidissait, contrairement à la nouvelle encre sympathique de Hellot.

Hellot testa les associations de différents minéraux et solutions pour arriver à son encre sympathique. À l'époque, un savant ne pouvait obtenir une solution de chlorure de cobalt chez un préparateur. Il devait la fabriquer. Hellot acheta le minerai à divers apothicaires locaux ou reçut des échantillons de cobalt de ses amis savants dans différents pays. Hellot fut si enchanté par la variété des couleurs possibles qu'offrait le cobalt qu'il imagina d'utiliser les encres et colorants obtenus pour peindre des paysages d'hiver qui se transformeraient en scènes printanières sous l'effet de la chaleur. L'idée fut un succès et, bientôt, les pare-feu à paysage changeant firent fureur à Paris, déclinés au XIX[e] siècle sous la forme de pare-feu portatifs que les dames utilisaient pour protéger leur visage de la chaleur de l'âtre.

Plus tard au XIX[e] siècle, les chimistes se sont aperçus que le changement de couleur associé aux composés à base de cobalt dépendait non seulement de la chaleur, mais aussi de l'humidité de l'air. Le changement du papier du bleu ou vert au rose indique une forte humidité. Cette découverte conduisit à la création de poupées et d'arrangements floraux doublés d'indicateurs météorologiques. Les robes des poupées et les pétales des fleurs étaient imprégnés de chlorure de cobalt, de sorte qu'ils viraient du bleu au rose lorsque l'humidité, donc le risque de pluie, augmentait. Ces objets étaient souvent pris à tort pour des baromètres, puisqu'ils indiquaient l'humidité et non la pression atmosphérique.

Le mécanisme à l'origine du phénomène, cependant, resta longtemps une énigme. À l'époque de Hellot, nombre de chimistes renommés, tel le Français Pierre-Joseph Macquer, avaient décrit et promu l'encre sympathique de Hellot dans de nouveaux dictionnaires et des manuels de chimie. Par ce biais, les encres étaient devenues un sujet d'attention scientifique, mais les réponses étaient peu concluantes.

Hellot pensait que le changement de couleur n'était pas explicable scientifiquement. D'autres expérimentateurs l'attribuaient à l'effet de la chaleur et du froid. À la fin du XVIII[e] siècle, cependant, Edward Delaval, un chimiste anglais qui avait étudié la couleur des films métalliques, postula que le sel attirait l'humidité de l'air quand il était froid et la repoussait quand il était chauffé. Cette théorie est celle qui se rapproche le plus des explications modernes *(voir l'encadré page 76)*.

Dans les mains des magiciens

L'impact de l'encre sympathique de Hellot dépassa de loin le cercle des chimistes. À la fin du siècle des Lumières, la science s'était répandue des laboratoires privés et des sociétés royales à la presse populaire et à la culture urbaine. Salons philosophiques, cafés et musées se multipliaient dans les rues de Paris, et ces nouvelles institutions de science populaire s'animaient de conférences, d'expériences, de démonstrations de science. L'encre invisible s'accordait parfaitement avec ces passe-temps.

Ceux-ci n'étaient d'ailleurs pas sans danger, comme le découvrit Jean-Jacques Rousseau à ses dépens. En 1736, alors jeune homme, il essaya de produire de l'encre sympathique en s'inspirant des expériences d'un professeur de physique et avec l'aide des *Récréations mathématiques* de Jacques Ozanam, un mathématicien français du siècle précédent. Rousseau venait de remplir

L'AUTEUR

Kristie MACRAKIS est professeure d'histoire, technologie et société au Georgia Institute of Technology, à Atlanta. Cet article est adapté de son dernier livre, *Prisoners, Lovers, and Spies : The Story of Invisible Ink from Herodotus to al-Qaeda* (Yale University Press, 2014).

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

LES PARE-FEU À PAYSAGE CHANGEANT – une déclinaison de l'encre sympathique – devinrent à la mode à Paris au milieu du XVIII[e] et au XIX[e] siècles. Un paysage d'hiver avec des branches dénudées était peint à l'encre de Chine sur un pare-feu. Puis une solution de chlorure de cobalt était utilisée pour créer des arbustes luxuriants, et de l'acétate de cobalt pour le ciel. Initialement, le cobalt était invisible *(a)*, mais dès que la chaleur du feu atteignait l'écran, le paysage désolé verdoyait *(b)*. Quand la source de chaleur s'estompait, la scène hivernale réapparaissait.

une bouteille du mélange obtenu – une solution de chaux vive et d'orpiment – et de la boucher quand « l'effervescence commença presqu'à l'instant très violemment », raconte-t-il dans ses *Confessions*. Il courut à la bouteille pour la déboucher, mais arriva trop tard. La bouteille lui « sauta à la figure comme une bombe ». Rousseau avala tant de chaux et d'orpiment qu'il faillit en mourir. Il resta aveugle pendant plus de six semaines.

Mais la science qui attirait le plus les badauds de Paris au XVIIIe siècle s'écartait du courant académique. Il s'agissait de science alternative, parfois même de ce qu'on appellerait aujourd'hui la pseudoscience. Franz Mesmer envoûtait les Parisiens avec ses expériences sur le magnétisme animal ; Jean Nollet électrisait les spectateurs dans des présentations où une charge se propageait à travers une rangée de personnes ; et les frères Montgolfier avaient déclenché un engouement pour les ballons en tous genres. La science enivrait.

Devenue une part de la culture populaire, la science fournit à la fois du divertissement et une éducation générale. Des magiciens scientifiques menaient la danse, à commencer par Henri Decremps, professeur et présentateur d'amusements physiques, et l'Italien Giuseppe Pinetti, surnommé le Professeur de magie naturelle. Tous deux firent des tournées à Paris et à Londres, présentant des « amusements physiques et différentes expériences divertissantes ». Mais Pinetti n'était qu'un magicien de scène. Decremps mit un point d'honneur à démasquer les charlatans ; il expliqua les expériences de Pinetti comme de simples astuces. Ces révélations ruinèrent la carrière du magicien à Paris.

L'encre sympathique faisait partie des secrets que Decremps révéla. Dès lors, tout un chacun put, chez lui, choisir parmi cinq sortes d'encres sympathiques développées par un liquide, de l'air, de la poudre ou du feu, et créer des paysages changeants ou divers jeux de bonne aventure impliquant une question écrite à l'encre classique et une réponse à l'encre sympathique. Les magiciens, cependant, détournèrent ces procédés de façon à donner l'impression d'avoir des pouvoirs extraordinaires. Par exemple, dans un tour appelé le livre du destin, un compartiment secret conçu dans la couverture d'un livre permettait d'y cacher un papier imbibé d'« encre vivifiante », fabriquée à partir de chaux vive et d'orpiment. Le magicien préparait sur plusieurs papiers une question à l'encre classique et une réponse en encre sympathique faite avec de l'oxyde de plomb rouge ou du bismuth. Lors du spectacle, il demandait à une personne de choisir un papier, le glissait dans le livre, le maintenait fermé pendant deux-trois

La chimie des encres invisibles

Les encres invisibles apparaissent et disparaissent grâce à divers mécanismes chimiques dont voici quelques-uns des plus courants, explicités à [illegible] formes de l'encre sympathique de Hellot utilisée pour peindre des paysages changeants sur des pare-feu.

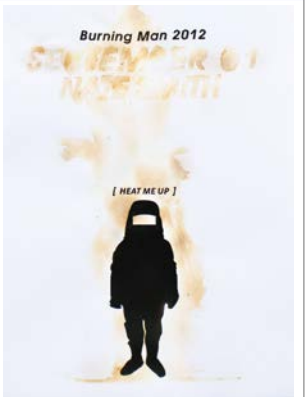
Les couleurs changeantes de ces pare-feu étaient peintes avec une solution diluée de chlorure de cobalt. En solution aqueuse, les molécules d'eau remplacent les ions chlorure et forment un complexe avec le cobalt, créant un ion octaédrique rose pâle, l'ion hexaaquacobalt(II). La couleur rose du chlorure de cobalt ne se voit pas à l'œil nu lorsque la solution a séché sur du papier. Toutefois, quand le complexe est chauffé au-dessus de la température ambiante, les molécules d'eau migrent, ce qui permet aux ions chlorure d'interagir plus fortement avec le cobalt. La structure prend alors une forme anhydre, d'une intense couleur bleue. Quand la substance est utilisée sur un pare-feu, la chaleur révèle le paysage peint. La réaction est réversible : quand le complexe revient à la température ambiante, l'humidité de l'air réhydrate lentement le cobalt, ce qui le reconvertit dans sa forme hydratée, rose pâle.

Comme nombre de jus de fruits, le jus de citron, utilisé sur du papier, constitue une encre invisible classique que la chaleur révèle en un brun visible. La chimie du procédé, qui revient à une dégradation thermique accélérée de la cellulose constituant le papier, est étonnamment complexe. Les acides du jus de citron aident à démarrer des réactions qui enlèvent les molécules d'eau et créent des radicaux libres – des molécules chargées très réactives. Ces réactions carbonisent le papier, produisant un mélange complexe de matériaux bruns. Le sulfate de cuivre, une autre encre révélée par la chaleur, brûle le papier en catalysant des réactions de dégradation similaires.

Avant l'introduction des colorants synthétiques, des tanins extraits d'excroissances (des galles) de certains chênes, étaient combinés avec des sels de fer pour fabriquer de l'encre noire. Le jus de la galle de chêne a aussi été utilisé comme encre invisible révélée à l'aide de sels de fer. Le principal composant de l'extrait, l'acide tannique, est une molécule complexe, consistant en un sucre lié à cinq unités d'une substance nommée acide digallique.

Au sein de la molécule d'acide tannique, un atome de fer peut former un complexe en de multiples endroits. Quand les tanins sont combinés avec des sels de fer, les complexes ainsi formés modifient les niveaux d'énergie électronique de l'acide tannique, brun pâle, intensifiant ses propriétés d'absorption de la lumière et formant ainsi une molécule très colorée. Comme un atome de fer peut se lier à six autres atomes, chaque atome de fer peut former un complexe avec plus d'une molécule d'acide tannique. De plus, chaque molécule d'acide tannique peut aussi accepter plus d'un atome de fer. Ainsi, on obtient un mélange complexe de colorants constitués de polymères de structure assez simple, mais de poids moléculaire élevé, lequel produit une intense couleur noire pouvant servir d'encre grand teint.

– Jason Lye
Evco Works Inc., Atlanta



DU JUS DE CITRON a été utilisé pour écrire les informations sur cette invitation à un événement du festival artistique Burning Man, dans le Nevada. Le destinataire a dû la chauffer pour la déchiffrer.

minutes, puis le ressortait : la réponse à l'encre sympathique était apparue grâce à la propagation du révélateur et de ses vapeurs à travers les pages du livre.

À la fin du XVIII[e] siècle, on vit un regain d'intérêt pour la magie naturelle ; l'encre invisible, avec ses substances naturelles, était dans le ton. Certains praticiens étaient des illusionnistes et des magiciens de scène qui manipulaient la réalité à l'aide de tours de passe-passe. D'autres étaient des scientifiques que la mode des tours de magie servant d'emballage pour l'éducation scientifique enchantait, et nombre d'entre eux écrivaient des livres dans ce sens.

Ces nouveaux livres de magie naturelle contenaient moins de physique expérimentale et plus d'effets physiques spectaculaires, dont l'encre sympathique. Citons par exemple *Die natürliche Magie : aus allerhand belustigenden und nützlichen Kunststücken bestehend* (« La magie naturelle, consistant en toutes sortes d'amusements et de tours utiles », 1779), une série monumentale de Johann Wiegleb, un des apothicaires-chimistes les plus informés et respectés de l'Allemagne des Lumières.

À l'assaut des cabinets de chimie

L'explosion d'intérêt pour la magie naturelle coïncida avec l'invention des cabinets de chimie, des caisses pleines de fournitures pour les expérimentateurs amateurs. En 1791, le chimiste et pharmacien allemand Johann Göttling construisit l'un des premiers cabinets portables de chimie. Les tubes à essai n'étaient pas inclus dans le kit ; Göttling utilisait un verre à vin pour mélanger les produits. La tradition de magie naturelle et ces cabinets portables de chimie conduisirent au design et au marketing des coffrets de chimie modernes.

Des ouvrages tels que *Conversations in Chemistry* (1805), de l'auteure britannique Jane Marcet, écrit comme une discussion et prenant ses exemples dans la vie quotidienne, ou *Chemical recreations* de John Griffin, publiées au milieu du XIX[e] siècle, contribuèrent à la popularité de la chimie. Le chimiste britannique y consignait des descriptions de l'encre sympathique de Hellot et quelques histoires associées. Sa compagnie, J. J. Griffin and Sons, se mit à fabriquer et à vendre onze sortes de cabinets de chimie, dominant le marché pour quelque cinquante ans, jusqu'au déclenchement de la Première Guerre mondiale.

Cette popularité de la chimie coïncida avec un engouement, au milieu du XIX[e] siècle, pour les spectacles de magie dans les salons privés. Les chimistes encourageaient les prestidigitateurs à intégrer à leurs tours des expériences de chimie, souvent impliquant un composant devenant invisible. Les cabinets de chimie fournissaient la matière première de ces activités. Des manuels enseignaient aussi aux magiciens amateurs des illusions optiques, mécaniques ou magnétiques.

Au début du XX[e] siècle, nombre de magiciens étaient devenus des prestidigitateurs scientifiques. Le « professeur » Ellis Stanyon offrait des cours de « Feu et magie chimique » à son « École de magie » de Londres. Ces cours mettaient l'accent sur la magie scientifique et ne faisaient pas appel à la sorcellerie. Le monde est maintenant bâti sur des « principes physiques », non sur des « arts noirs », écrivait le magicien américain Harry Blackstone en 1959 dans une réédition du manuel *Chemical Magic* (1930), du chimiste et magicien amateur John Lippy. « La magie reste avec nous – pas la magie noire, mais la magie qui amuse […], la magie qui, sous son meilleur jour, fascine. » Et dans cette métamorphose, l'encre invisible a joué un rôle particulier. S'éloignant de ses liens précoces avec l'alchimie, elle s'est transformée au fil des siècles en un outil de choix pour démontrer le pouvoir de la chimie et présenter sa valeur divertissante à un vaste public.

Après les deux guerres mondiales, l'encre invisible acquit une autre identité tout aussi populaire : elle devint synonyme d'intrigue internationale et d'espionnage. Durant la seconde moitié du XX[e] siècle, les livres et jeux pour enfants se mirent à évoquer des agents secrets usant d'encre invisible et de stylos ultraviolets, et le citron devint le complice des petits espions en herbe. Ainsi l'encre invisible a-t-elle traversé l'histoire et les modes. Elle est certes devenue un jeu d'enfant. Mais pour nombre de jeunes curieux, elle constitue une passerelle pour découvrir la magie de la chimie et ouvrir leur imagination scientifique – voire celle de leurs parents. L'histoire des messages invisibles n'est d'ailleurs pas terminée. En 2011, Manuel Palacios et David Walt, de l'université Tufts, George Whitesides, de l'université Harvard, et leurs collègues ont développé une matrice constituée de colonies de microorganismes qui délivrent des messages sur demande en changeant de couleur… ■

LES CABINETS DE CHIMIE destinés aux chimistes amateurs ont fleuri à la fin du XVIII[e] siècle et au XIX[e]. Certains avaient la taille d'un bureau. D'autres étaient plus petits, tel le modèle pour étudiant ci-dessus, conçu par le Britannique William Statham au XIX[e] siècle.

BIBLIOGRAPHIE

K. Macrakis, **Prisoners, Lovers, and Spies : The Story of Invisible Ink from Herodotus to al-Qaeda**, Yale University Press, 2014.

S. Al-Gailani, **Magic, science, and masculinity : marketing toy chemistry sets**, *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 40, pp. 372-381, 2009.

J. Hellot, **Sur une nouvelle encre sympatique**, *Histoire de l'Académie royale des sciences*, pp. 101-120 et pp. 228-247, 1737, en ligne sur gallica.bnf.fr.

A VOIR

Le secret de l'État. Surveiller, protéger, informer. XVII[e]-XX[e] siècle, exposition des Archives nationales, à l'Hôtel de Soubise, à Paris, jusqu'au 28 février 2016.

Un volet est consacré à l'histoire des techniques et des langages du secret. http://bit.ly/1VaZnCP

LOGIQUE & CALCUL

Paver avec des tatamis

Les tapis japonais ont des proportions bien définies. De combien de façons peuvent-ils recouvrir une pièce rectangulaire ? Grâce à une contrainte géométrique traditionnelle, la question devient intéressante.

Jean-Paul DELAHAYE

Au Japon, on recouvre traditionnellement le sol des habitations de tapis de paille de riz soigneusement serrés : les tatamis. Ils sont le plus souvent de dimension 91 × 182 cm ou 88 × 176 cm (à Tokyo). Dans toutes les régions, ils forment des rectangles aux proportions 1 × 2, auxquels on ajoute parfois des tatamis carrés 1 × 1. Le tatami est utilisé comme unité d'aire ; sa largeur détermine souvent la taille des pièces d'une maison ainsi que celles des portes et des fenêtres. Lorsqu'on dispose les tatamis, on s'arrange pour qu'en aucun point ne se rencontrent quatre tatamis *(voir l'encadré page ci-contre)*. La raison – esthétique ou pratique ? – n'est pas bien claire, mais cette tradition semble respectée partout au Japon.

La contrainte « Jamais quatre tatamis en un même point » intéresse les mathématiciens. Elle a suscité, depuis une dizaine d'années, d'étonnantes recherches, dont celles d'Alejandro Erickson, qui a soutenu en 2013 une thèse sur le sujet à l'université de Victoria, au Canada. Il se trouve en effet que la règle imposée limite fortement les combinaisons possibles, sans toutefois imposer un nombre trop restreint de dispositions dont on trouverait facilement une caractérisation. Le mathématicien aime ce genre de situations !

Dans un premier temps, nous n'envisagerons que les pavages sans carrés. Par définition, le pavage d'une forme géométrique par des rectangles 1 × 2 respectant la contrainte des tatamis sera un « pavage tatami-parfait ». Lorsque l'utilisation de tatamis 1 × 1 sera autorisée, nous parlerons de « pavages à tatamis ».

Pavages tatami-parfaits

L'encadré ci-contre donne un décompte du nombre de pavages tatami-parfaits pour les rectangles les plus petits et fournit pour certains rectangles les listes de pavages différents. On remarquera que même lorsque l'aire d'un rectangle est paire, il peut n'exister aucun pavage tatami-parfait. Le plus petit rectangle pour lequel cette situation d'impossibilité se produit est le rectangle 7 × 10.

Ce tableau provient d'un travail de Dean Hickerson réalisé en 2002 et complété par Frank Ruskey et Jennifer Woodcock en 2009. Les chercheurs sont parvenus au résultat suivant. Notons $T(m, n)$ le nombre de pavages tatami-parfaits du rectangle m 3 n correspondant au tableau ; quatre cas sont à distinguer.

(a) $T(1, n)$ vaut 1 si n est pair, et 0 si n est impair (ce qui est évident !).

(b) $T(2, n)$ est égal au nombre de façons d'écrire l'entier n comme une somme de 1 et de 2 sans qu'il y ait deux 2 consécutifs. Exemple : l'entier 5 s'écrit 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 2 + 1 + 1 + 1 = 1 + 2 + 1 + 1 = 1 + 1 + 2 + 1 = 1 + 1 + 1 + 2 = 2 + 1 + 2, il y a donc 6 pavages tatami-parfaits pour le rectangle 2 × 5.

(c) Si m est impair et supérieur à 1, $T(m, n)$ est le double du nombre de façons d'écrire n comme une somme de $m-1$ et de $m+1$. Ainsi, $T(5, 10) = 4$, car $10 = 4 + 6 = 6 + 4$. Le fait qu'il n'existe pas de pavages tatami-parfaits pour 7 × 10 se comprend maintenant aisément : 10 ne peut pas s'écrire comme somme de nombres égaux à 6 ou à 8.

(d) Si m est pair et supérieur à 2, $T(m, n)$ est le nombre de façons d'écrire n comme somme de nombres pris parmi 1, $m-2$ et m en s'arrangeant pour qu'un terme sur deux soit un 1. Par exemple, $T(6, 12) = 4$ car $12 = 1 + 4 + 1 + 6 = 1 + 6 + 1 + 4 = 4 + 1 + 6 + 1 = 6 + 1 + 4 + 1$.

L'encadré page 80 décrit la structure générale des pavages tatami-parfaits de rectangles et illustre pourquoi le nombre de solutions au problème du pavage est lié aux dénombrements arithmétiques indiqués ci-dessus.

Ces conclusions sont fondées sur des résultats intermédiaires soigneusement démontrés. Toutefois, en manipulant des dominos à la recherche de solutions et en s'aidant de l'encadré page 80, on se persuade de l'exactitude des résultats mentionnés sans qu'il faille lire la dizaine de pages de la démonstration complète. Parmi les résultats généraux intéressants sur les pavages tatami-parfaits, il y a celui indiquant que connaître la disposition des tatamis sur le pourtour du rectangle qu'on cherche à paver détermine entièrement le pavage intérieur s'il est possible.

Dans le domaine de la combinatoire, il est souvent impossible de donner une expression simple (comme $2n$, $n(n+1)(n+2)/3$, ou $5n+n!$) pour les suites rencontrées. Cependant,

Pavages tatami-parfaits avec des dominos

Recouvrir un rectangle $m \times n$ par des dominos 1×2 sans que quatre dominos ne se rencontrent en un point, telle est la contrainte des tatamis parfaits. Ce problème [illegible] depuis quelques années.

Pour un rectangle $m \times n$, quand la contrainte est acceptée, la configuration obtenue est un « pavage tatami-parfait »: les configurations A, B, C, D sont permises, les configurations E, F, G sont interdites. De tels pavages ne sont pas toujours possibles.

Quand m et n sont tous les deux impairs, leur produit est impair; il n'existe alors pas de pavages tatami-parfaits du rectangle $m \times n$, l'aire d'un domino étant paire. Cependant, ce n'est pas le seul cas d'impossibilité: par exemple, les rectangles 10×7, 8×11 ou 4×10 n'admettent aucun pavage tatami-parfait.

Le tableau en haut à droite donne le nombre de solutions en fonction de m et n, où l'on compte toutes les solutions, dont celles qui se déduisent d'autres par symétrie ou rotation. Ce tableau est l'une des conséquences de résultats démontrés par Dean Hickerson en 2002.

Avec le tableau vous disposez d'une belle série de puzzles amusants. Après avoir découpé suffisamment de rectangles 1×2 [illegible] réuni quelques jeux de domi[illegible]nos, choisissez une valeur du tableau, par exemple celle indiquant qu'il existe six pavages tatami-parfaits pour le rectangle 2×6, et recherchez-les tous.

Les dessins du bas montrent des solutions pour les plus simples des puzzles: 2×2, 2×4, 3×4, 4×4, 4×5, 4×6 et 5×6 (nous n'avons pas représenté les solutions qui se déduisent d'autres par symétrie ou rotation).

Dénombrement des pavages tatami-parfaits

Par pavage, nous entendrons ici pavage tatami-parfait.

Hauteur 1. Il n'existe de pavages tatami-parfaits pour le rectangle $1 \times m$ que si m est pair, et un seul pour chaque m.

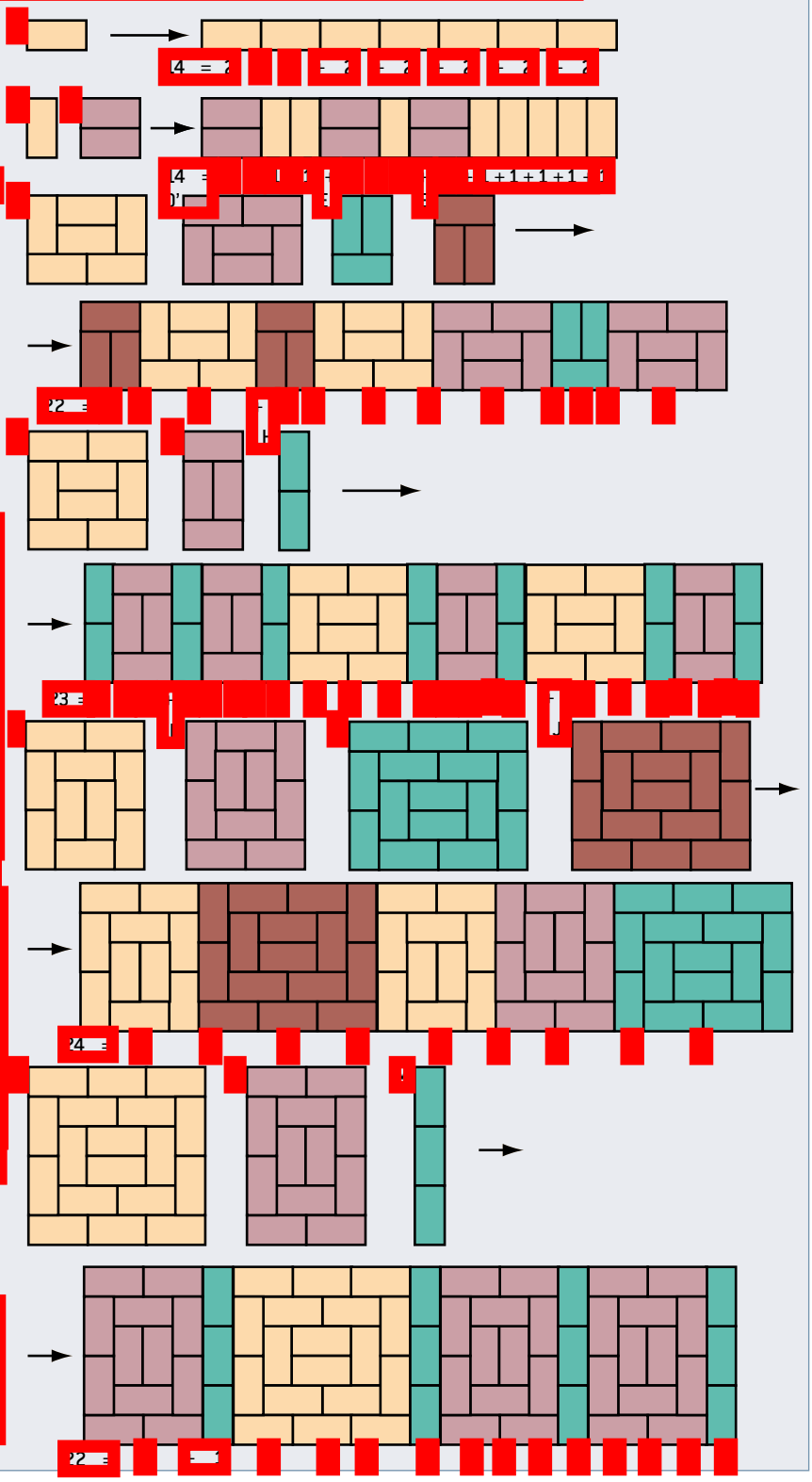
Hauteur 2. Il existe deux composants de base, B et C. Tous les pavages du rectangle $2 \times m$ s'obtiennent en accolant des copies de ces deux composants sans jamais mettre deux C côte à côte. Par exemple, le rectangle 2×14 est obtenu par l'accolement C, B, B, C, B, C, B, B, B, B, B. Ainsi, le nombre de façons de paver le rectangle $2 \times m$ est le nombre de façons d'écrire m comme une somme de nombres 1 et 2 sans deux 2 consécutifs.

Hauteur 3. On a quatre composants de base : D, D', E et E'. Deux lettres nues (D, E) ne peuvent être côte à côte, et *idem* pour deux lettres primées (D', E'). Les juxtapositions de lettres prises parmi D, D', E, E' respectant cette règle donnent un pavage tatami-parfait. Par exemple, pour le rectangle 3×22, la juxtaposition E'DE'DD'ED' est satisfaisante. Le nombre de façons de paver le rectangle $3 \times m$ est égal au double (car on peut commencer par une lettre nue ou primée) du nombre de façons d'écrire m comme somme composée de 2 et de 4.

Hauteur 4. Il y a maintenant trois composants de base : F, G et H. Une juxtaposition sera bonne si un composant sur deux est H (F et G ne peuvent être côte à côte). Ainsi, pour le rectangle 4×23, la juxtaposition HGHGHFHGHFHGH convient. Le nombre de façons de paver le rectangle $4 \times m$ est le nombre de façons d'écrire m comme une somme de 1, de 2 et de 4 en mettant un 1 une fois sur deux dans la somme.

Hauteur 5. Analogue au cas « Hauteur 3 », de même que pour toute hauteur impaire $n = 2k + 1$. Il y a quatre composants de base, I, I', J et J', donnant des pavages pour les rectangles $n \times (n-1)$ et $n \times (n+1)$.

Hauteur 6. Analogue au cas « Hauteur 4 », de même que pour toute hauteur paire. Il y a trois composants de base, K, L et M, de taille $n \times (n-2)$, $n \times n$ et $n \times 1$, et il faut alterner le M avec l'un des deux autres.



on réussit parfois à résumer toute l'information d'une suite compliquée de terme général a_n avec ce que l'on dénomme sa « fonction génératrice » $f(z)$, définie par :

$$f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \ldots + a_n z^n + \ldots$$

Cette expression est une façon d'obtenir une formule très courte donnant la suite. En voici un exemple. Le nombre de façons de composer un mot de n lettres avec des x et des y est $a_n = 2^n$: il y a deux choix pour la première lettre, deux choix pour la seconde, etc. Soit f la fonction associée à cette suite a_n par la formule donnée ci-dessus. Comme chaque terme est égal à $2^n z^n$, on reconnaît une suite géométrique de raison $2z$; on a donc $f(z) = 1/(1-2z)$, cette égalité valant pour tout nombre z réel ou complexe vérifiant $|z| < 1/2$. La fonction $f(z) = 1/(1-2z)$ exprime ainsi indirectement les valeurs de $a_n = 2^n$: c'est la fonction génératrice de la suite 2^n.

Fonctions génératrices

La fonction génératrice de la suite donnée en exemple n'est guère plus simple que la suite elle-même et n'est pas très utile, mais, assez fréquemment, on ne dispose pas de formule élémentaire pour la suite alors que sa fonction génératrice est d'expression simple. C'est le cas pour le décompte du nombre de pavages tatami-parfaits. Le nombre de ces pavages pour les rectangles de hauteur 2 est le nombre $b_n = T(2, n)$ dont la construction ne correspond pas à une expression facile. En revanche, la fonction génératrice de la suite b_n est assez simple : $f(z) = (1+z^2)/(1-z-z^3)$. C'est aussi le cas de la fonction génératrice de la suite donnant le nombre de pavages tatami-parfaits de hauteur m. Frank Ruskey et Jennifer Woodcock ont ainsi établi en 2009 que :

$f(z) = 1$ si $m = 0$,
$f(z) = 1/(1-z^2)$ si $m = 1$,
$f(z) = (1+z^2)/(1-z-z^3)$ si $m = 2$,
$f(z) = (1+z^{m-1}+z^{m+1})/(1-z^{m-1}-z^{m+1})$

si m est impair et pour $n \geqslant m \geqslant 3$, et

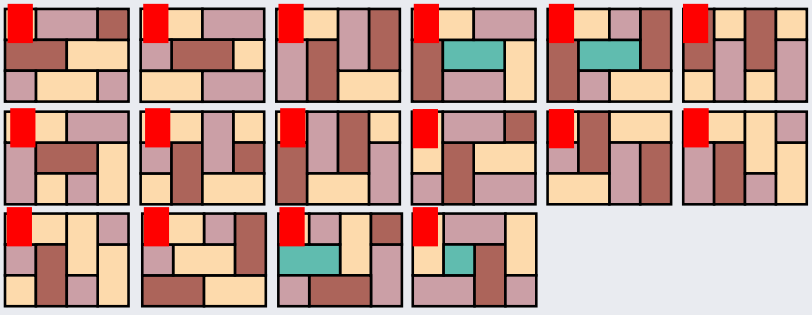
$f(z) = (1+z)(1+z^{m-2}+z^m)/(1-z^{m-1}-z^{m+1})$

si m est pair et pour $n \geqslant m \geqslant 4$.

$T(m, n)$ est alors donné par le coefficient de z^n dans le développement de $f(z)$ en une somme de puissances de z. Ces formules sont au

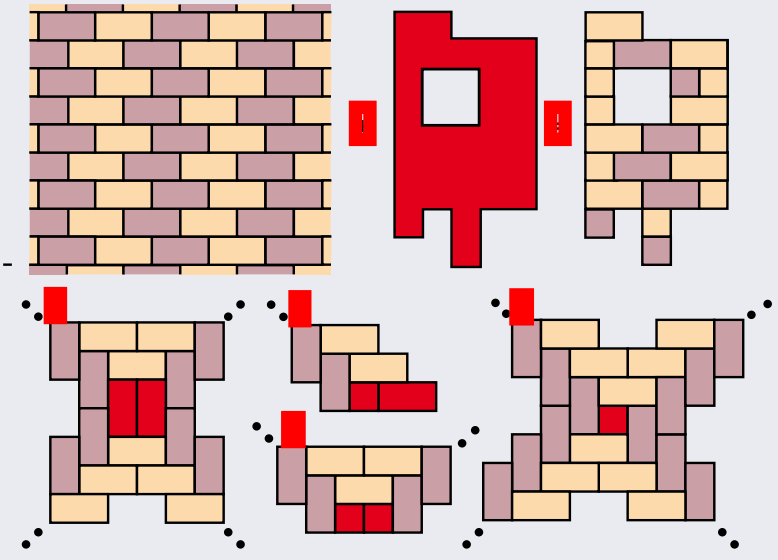
Pavages avec des dominos et des carrés

Si, en plus des tatamis 1×2, on autorise l'utilisation de tatamis carrés 1×1 (en imposant toujours la contrainte que quatre tapis ne doivent jamais se rencontrer en un même point), le nombre de façons de paver un rectangle se regroupent en 16 classes représentées ci-dessous, le nombre de pavages d'une même classe (pavages se déduisant par symétrie ou rotation) étant indiqué en haut à gauche du représentant de chaque classe.



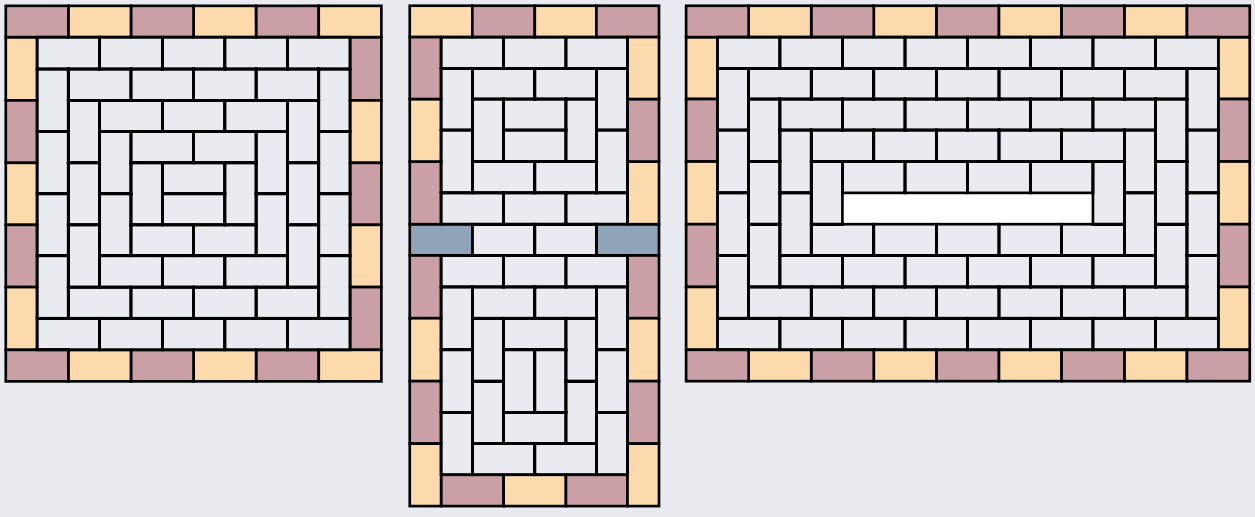
Les quatre noyaux et les contraintes induites

Tout rectangle à coordonnées entières se pave d'une façon au moins par des tatamis 1×2 et 1×1 sans que quatre tatamis se rencontrent en un même point. C'est évident en considérant les pavages « mur de briques » : la [illegible] indiqué ci-dessous. Il existe quatre « noyaux » A, B, C, D présents dans un pavage de rectangles par des tatamis 2×1 et 1×1. Chacun d'eux engendre des contraintes sur les tatamis voisins qui se prolongent jusqu'aux côtés du rectangle.



Le pourtour détermine l'intérieur

Un théorème de la théorie des pavages tatami-parfaits [illegible] du pavage sur le pourtour d'un rectangle est suffisante pour retrouver toute la disposition intérieure des tatamis, si elle est possible. Ci-dessous, les pourtours de trois rectangles sont représentés en couleurs. Deux d'entre eux se complètent et donnent un pavage tatami-parfait du rectangle, alors que le troisième, à droite, conduit à une impossibilité. On s'en rend compte en plaçant une couronne intérieure obligatoire pour respecter la contrainte), puis une autre, puis une troisième, puis une quatrième. On se retrouve alors dans une configuration finale où il est impossible de poursuivre.



centre d'une anecdote mettant en scène Donald Knuth, le célèbre auteur de *The Art of Computer Programming*, traité de référence de l'algorithmique. Dans son ouvrage, Donald Knuth propose en exercice d'écrire un programme pour calculer les nombres $T(m, n)$ (il s'est intéressé avant tout le monde aux dispositions japonaises de tapis).

Avec la solution, il énonce une conjecture sur ces nombres et en propose une fonction génératrice. L'expression conjecturée n'est cependant pas correcte et comme Donald Knuth avait promis un dollar à toute personne qui lui indiquerait une erreur dans son traité, il dut signer un chèque de un dollar aux auteurs des formules ci-dessus, chèque qu'ils ont soigneusement photocopié et qu'ils exhibent fièrement à chaque fois qu'ils présentent un exposé sur les pavages tatami-parfaits.

Puisque les Japonais utilisent parfois des tatamis carrés, le problème général des pavages par tatamis doit les prendre en compte (toujours avec la contrainte « Jamais quatre tatamis en un même point »).

Avec des tatamis carrés

On s'aperçoit vite que l'on ne peut utiliser qu'un nombre assez limité de tatamis carrés, et que trouver, compter et caractériser tous les pavages à tatamis n'est pas une tâche évidente, même en ne s'intéressant qu'aux pavages de rectangles. L'encadré page 81, en haut, indique les 16 classes donnant (par symétrie et rotation) les 44 solutions pour le rectangle 3×4.

Cette fois, tous les rectangles admettent au moins un pavage, car la forme « mur de briques » convient parfaitement *(voir l'encadré page 81, en bas)*. Quand on considère d'autres pavages à tatamis de rectangles, on remarque qu'il existe quatre dispositions de base ; nous les dénommerons « noyaux », qui engendrent de proche en proche des contraintes sur les autres tatamis jusqu'au bord du rectangle qu'on cherche à recouvrir. Ces noyaux ont été nommés « hamburger » (deux rectangles 1×2 collés par un grand côté), « cyclone » (un carré entouré de quatre rectangles 1×2), le V (deux carrés côte à côte), le I (un rectangle 1×2 collé sur un petit côté avec un carré). On montre sans mal que le V et le I sont nécessairement placés sur les bords du rectangle qu'on cherche à paver. Le hamburger peut être partout, horizontalement ou verticalement. Le cyclone admet deux variantes, selon le sens dans lequel il tourne, et peut se retrouver partout lui aussi. Tout pavage à tatamis d'un rectangle n'est en définitive que le résultat obligé de quelques noyaux qui contraignent les autres tatamis, ces contraintes s'étendant sur toute la surface du rectangle recouvert.

On notera et on démontrera sans mal que, à part le carré au centre d'un cyclone, un tatami carré isolé ne peut être présent que sur un bord du rectangle pavé.

Toutefois, placer au hasard des noyaux dans un rectangle ne conduit pas toujours à un pavage à tatamis correct. En effet, chaque noyau engendre des diagonales contraintes qui, si elles se rencontrent, doivent être compatibles, ce qui est lié à la parité de leur écartement. Alejandro Erickson et les autres chercheurs déjà mentionnés ont tiré de toutes ces remarques une caractérisation précise des pavages à tatamis de rectangles. Elle est assez compliquée, mais permet de démontrer des résultats intéressants et précis. Notons $T(r, c, m)$ le nombre de pavages à tatamis d'un rectangle de hauteur r, de largeur c et comportant m tatamis carrés. Voici quelques propriétés aujourd'hui établies.

– Si $T(r, c, m)$ est strictement positif, alors m et le produit rc ont la même parité, et m est inférieur ou égal au maximum de $(r+1, c+1)$.

– Soient m et n deux entiers de même parité. Le nombre de pavages à tatamis du carré $n \times n$ comportant exactement m tatamis carrés est nul si $m > n$, égal à $n\,2^n$ si $m = n$, et égal à $m^{2m} + (m+1)^{2m+1}$ si $m < n$.

– Les décomptes sont maintenant beaucoup plus compliqués, mais pour une hauteur donnée, il a été démontré que la fonction génératrice de la suite est un quotient de polynômes dont on sait calculer les coefficients.

Comme pour les pavages tatami-parfaits, si un rectangle possède un pavage de tatamis, alors il semble que la connaissance de ce pavage sur le pourtour du pavage le détermine complètement. Cependant, cette propriété n'est pour l'instant qu'une conjecture.

Aujourd'hui, résoudre les problèmes par *oui* ou *non*, mener des décomptes et obtenir des formules ou des séries génératrices n'est plus la seule préoccupation des mathématiciens : ils veulent aussi des algorithmes ou au moins savoir quels types d'algorithmes sont possibles ou impossibles.

Quand on se donne une forme quelconque composée de carrés collés par leurs côtés (ces formes sont dénommées « polygones orthogonaux ») et que l'on s'intéresse à leurs pavages par tatamis, la question naturelle qui se pose est : est-il possible ou non de trouver par algorithme un pavage à tatamis ou un pavage tatami-parfait ? Dans le cas des rectangles, les résultats expliqués précédemment montrent que la réponse est calculable par algorithme et qu'on peut le faire rapidement (on peut répondre *oui* ou *non* en un temps majoré par un polynôme en k, où k est l'aire du rectangle mesurée en nombre de tatamis 1×1).

Et les polygones orthogonaux ?

Dans le cas des pavages simples par dominos (donc sans la contrainte « Pas de rencontre de quatre dominos en un point »), on connaît des algorithmes indiquant en temps polynomial si la forme peut être pavée, et d'ailleurs on connaît de tels algorithmes non seulement pour les rectangles, mais aussi pour les polygones orthogonaux quelconques.

Un deuxième cas facile est celui de savoir si un polygone orthogonal admet un pavage à tatamis (avec des rectangles 1×2 et 1×1). La réponse est toujours *oui* : on prend le pavage en mur de briques de tout le plan, et on y découpe le polygone orthogonal ; certains tatamis 1 3 2 sont coupés et créent des tatamis 1×1, mais tout ce qu'il y a à l'intérieur du polygone orthogonal découpé est bien un pavage à tatamis convenable.

Un cas restait difficile, celui des pavages tatami-parfaits (uniquement des tatamis 1×2, et respect de la règle « Jamais quatre tatamis en un même point »). L'analyse de la question dans le cas général des polygones orthogonaux a été difficile, mais Alejandro Erickson et Frank Ruskey ont démontré en 2013 que le problème est NP-complet. Cela signifie que si la conjecture $P \neq NP$ est vraie (ce que l'on considère comme très probable), alors il n'existe pas d'algorithme permettant de savoir rapidement (en un temps polynomial) si un polygone orthogonal quelconque admet un pavage tatami-parfait. Cette propriété exprime que trouver des pavages tatami-parfaits demande en général une longue et difficile recherche. Puisque c'est devenu un théorème, on peut donc affirmer : les problèmes de tatamis sont des casse-tête... chinois ! ■

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

A. Erickson et F. Ruskey, **Generating tatami coverings efficiently**, prépublication arXiv:1403.4726, 2014.

A. Erickson et F. Ruskey, **Domino tatami covering is NP-complete**, dans *Combinatorial Algorithms* (Lecture Notes in Computer Science n° 8288), Springer, pp. 140-149, 2013.

A. Erickson, **Monomino-domino tatami coverings**, thèse, université de Victoria, 2013.

A. Erickson et F. Ruskey, **Enumerating maximal tatami mat coverings of square grids with *v* vertical dominoes**, prépublication arXiv:1304.0070, 2013.

Références supplémentaires sur www.pourlascience.fr

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

SCIENCE & FICTION

Hulk et la grenouille, champions de la métamorphose

Certains personnages de fiction sont capables de changer radicalement et rapidement de forme. La nature n'est pas en reste dans ce domaine !

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

De nombreux héros et autres monstres imaginaires présentent l'extraordinaire capacité de changer de forme rapidement, de leur plein gré (comme chez les Barbapapas) ou à leur insu (Bruce Banner devient Hulk sous l'effet de la colère). D'Ovide (*Métamorphoses*, achevé vers l'an 10 de notre ère) à Franz Kafka (*La Métamorphose*, 1915), en passant par Robert Louis Stevenson (*L'Étrange cas du docteur Jekyll et de M. Hyde*, 1886), la transformation morphologique a toujours fasciné les auteurs.

La métamorphose est souvent synonyme de malédiction pour celui qui la subit. Au cœur de l'intrigue, elle est en général spectaculaire et irréaliste. Mais de nombreuses espèces animales subissent aussi des transformations impressionnantes. Quels processus biologiques se cachent derrière ces « effets spéciaux » de la nature ?

Le dieu Protée de la mythologie grecque, les princes des contes de fées transformés en grenouilles, les loups-garous et les vampires du folklore médiéval… : nombreux sont les êtres imaginaires qui changent de forme. Qu'ils soient victimes d'un sortilège, d'une malédiction ou au contraire qu'ils bénéficient d'un superpouvoir, ces personnages sont des *métamorphes* (du grec *meta*, qui veut dire « au-delà », et *morphe*, « la forme »). En sciences naturelles, le terme renvoie à la *métamorphose*, un changement rapide et draconien de forme au cours du développement.

BRUCE BANNER, *ALIAS* HULK, a été victime d'un accident dans un laboratoire de recherche. Il lutte pour maîtriser ses émotions, qui menacent de le métamorphoser en un géant vert, violent et incontrôlable.

C'est le cas des grenouilles, des insectes et de nombreux autres animaux parmi les mollusques, crustacés, cnidaires (coraux, méduses), échinodermes ou encore tuniciers (sortes de « sacs » marins). Tous ces « métamorphes », bien réels, se caractérisent par un développement discontinu en plusieurs phases très différentes, par exemple la phase larvaire qui dure plus ou moins longtemps avant le passage au stade adulte.

La métamorphose est un phénomène physiologiquement activé par la sécrétion d'hormones de croissance qui varient selon les groupes (ecdysone chez les insectes, hormone thyroïdienne chez les amphibiens…). Cette décharge hormonale dans l'organisme entraîne une cascade de changements : de nouveaux organes (ailes, pattes) apparaissent grâce à une prolifération cellulaire, certains se transforment (tel l'intestin spiralé des têtards qui se déroule lors de la métamorphose) tandis que d'autres organes (telle la queue du têtard) disparaissent définitivement par lyse (désintégration de la membrane cellulaire) ou apoptose (mort cellulaire programmée). Cette révolution morphologique à l'échelle de l'organisme s'accompagne souvent d'un changement important de taille, de masse et d'habitat : ainsi, le petit têtard, aquatique et essentiellement herbivore, se métamorphose en grenouille, adulte amphibie et carnivore.

Moins spectaculaire et radical que la métamorphose, le polymorphisme relève aussi de cette capacité biologique à changer de forme (la « plasticité phénotypique »).

LA METAMORPHOSE
d'un être imaginaire, qui passe d'une forme arthropode à une forme mammifère – ou inversement.

Il se distingue de la métamorphose, car il correspond à une diversité de formes à un stade du développement donné, généralement le stade adulte. Ainsi, les termites adultes d'une même espèce ont un aspect différent selon leur fonction. Un autre exemple est le dimorphisme sexuel qui se traduit souvent par une différence de taille entre mâles et femelles (par exemple chez les primates ou les araignées).

Le polymorphisme s'applique aussi à l'échelle de l'individu : la pieuvre est, à sa façon, un étonnant polymorphe capable de changer de couleur et de texture rapidement. On retrouve cette faculté chez Mystique. Cette mutante ennemie des X-men peut prendre l'apparence de n'importe quel autre humain, mutant ou non. Mystique n'est donc pas une métamorphe au sens strict du terme, mais plutôt une polymorphe. Un autre polymorphe est le personnage imaginé par Ayerdahl (*Sexomorphoses*, 1994), qui peut changer de sexe à volonté.

Les métamorphes classiques de la culture fantastique sont plutôt des thériomorphes (de *therion*, « bête sauvage » en grec), c'est-à-dire des humains capables de se transformer en d'autres animaux, souvent des mammifères : c'est le cas des loups-garous (ou lycanthropes), des ours-garous (tel Beorn dans *Le Hobbit*, de J. R. R. Tolkien) ou encore du professeur Jonathan Chase, *alias* Maniman de la série télévisée éponyme des années 1980, capable de se changer à volonté en panthère, faucon, cheval ou autre ! Certains X-men sont aussi des thériomorphes : c'est le cas du Fauve ou de Gorilla-Man.

Leurs transformations sont impressionnantes, mais la plus belle métamorphose de l'histoire du cinéma demeure celle du *Loup-garou de Londres* (1981) de John Landis, aidé de Rick Baker pour les formidables maquillages et effets spéciaux : la mutation du jeune lycanthrope, David Kessler, qui s'effectue dans la douleur, change sa morphologie (allongement de la face et des canines) mais aussi son ostéologie (allongement des métacarpes et métatarses, développement d'apophyses vertébrales) et sa physiologie (forte pilosité, pupilles jaunes, narines dilatées et oreilles pointues).

Une affaire d'hormones

La plupart de ces métamorphoses fantastiques sont réversibles (selon l'humeur, la phase de la Lune, l'état de transe…), ce qui n'est pas le cas des métamorphoses réelles : une mouche ne peut plus redevenir un asticot, tout comme une grenouille ne peut plus redonner un têtard. Afin de rendre plausibles ces métamorphes imaginaires – ou « animagus » pour reprendre le terme du ministère de la Magie dans la saga *Harry Potter* de J. K. Rowling –, il faudrait peut-être imaginer des êtres capables de secréter tantôt les hormones qui déclenchent la métamorphose (telles que les hormones thyroïdiennes citées plus haut) ou des stéroïdes, tantôt des hormones dites « juvéniles ».

Ces dernières ne sont pas fantaisistes, les insectes en sécrètent : elles agissent notamment dans le maintien de certains caractères larvaires et ont justement pour fonction de retarder la métamorphose. Des dérivés chimiques de ces hormones, nommés « composés juvénoïdes », sont connus naturellement chez d'autres arthropodes, crustacés et acariens notamment, mais aussi chez des plantes (telle une variété de pin américain, à l'origine d'ailleurs de leur découverte). Chez les insectes, ces hormones sont sécrétées par les « corps allates », des glandes endocrines logées juste derrière le cerveau.

On ne connaît pas de tels composés chez les vertébrés, mais on les synthétise en laboratoire : c'est le cas du méthoprène, une substance très active, même à faible dose, qui entre dans la composition d'insecticides. Il bloque le cycle de croissance des larves, qui ne passent jamais au stade adulte. Certes, ce composé ne rajeunit pas les espèces considérées comme nuisibles – il ne transforme pas des papillons en chenilles –, mais les dérivés juvénoïdes seraient peut-être une piste de recherche intéressante pour Bruce Banner qui s'évertue, par tous les moyens, à ne pas se transformer en Hulk à la moindre contrariété. ■

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

ART & SCIENCE

La glace brûle dans le triangle des Bermudes

Les disparitions soudaines dans le triangle des Bermudes seraient dues à de la « glace qui brûle », une forme du méthane qui libère ce gaz en se réchauffant : un bateau situé à l'aplomb de ces émanations ne serait plus porté. Et coulerait !

Loïc MANGIN

Il est environ midi, ce 9 février 1799, à quelques encablures de Niévès, une île des petites Antilles. L'équipage de l'*USS Constellation*, une frégate américaine commandée par Thomas Truxtun, repère l'*Insurgente*, un vaisseau français réputé très rapide. À son bord, le commandant Pierre-Michel Barreault, conformément aux ordres… décide de fuir (sa mission est de piller, pas de combattre). Une poursuite s'engage alors, puis un combat inégal, la frégate étant puissamment armée. La scène a été immortalisée par le contre-amiral John William Schmidt *(voir page ci-contre)*. Rapidement, le navire français, en piteux état après plusieurs bordées dévastatrices, est arraisonné et capturé. La capture de l'*USS Retaliation* par cette même *Insurgente* le 20 novembre 1798 est vengée. Nous sommes alors au paroxysme de la quasi-guerre qui opposa la France aux États-Unis pendant deux ans.

Deux ans plus tard, le 22 juillet 1800, l'*Insurgente*, réparée et rebaptisée *USS Insurgent*, appareille de Baltimore. Après une brève escale à Hampton Roads, au sud-est de la Virginie, elle file vers les Antilles où elle doit protéger les intérêts américains. Elle ne le fera jamais. Le vaisseau et tout son équipage ne donneront plus de nouvelles au-delà du 20 septembre.

Cette disparition soudaine, que l'on a en général imputée à une tempête tropicale violente, offrira au navire une nouvelle renommée : en effet, aujourd'hui, l'*USS Insurgent* est souvent cité parmi les premiers cas recensés dans les listes de disparitions mystérieuses qui auraient eu lieu dans le célèbre triangle des Bermudes…

Dans cette zone qui s'étend traditionnellement entre Miami, en Floride, l'archipel des Bermudes et San Juan, à Porto Rico, l'incidence des disparitions de bateaux ou d'avions serait bien supérieure à la normale. Précisons d'emblée que les statistiques des garde-côtes américains et celles des assureurs démentent cette idée.

La légende du triangle des Bermudes est née sous la plume de Vincent Gaddis, un journaliste américain qui, en 1964, s'est inspiré de quelques disparitions inexpliquées. Les adeptes du surnaturel se sont emparés de l'histoire et l'ont rendue populaire.

Le navire *USS Insurgent* a-t-il été capturé par des extraterrestres ou coulé par des bulles de gaz ?

Nombre d'œuvres de fiction (chansons, films, romans…) ont contribué au succès du mythe. Et l'on ne compte plus les élucubrations formulées pour expliquer le phénomène : extraterrestres, habitants de l'Atlantide, champs magnétiques hors normes, distorsion spatio-temporelle…

Et s'il y avait un peu de vrai dans tout ça ? Non pas dans ces hypothèses fantaisistes, mais dans une possible série d'accidents étranges qui resteraient sans explication. Dans ce cas, quelle cause invoquer ? Les récents travaux de Pavel Serov, de l'université arctique de Tromsø, en Norvège, offrent une réponse.

Ses collègues et lui ont étudié avec les outils de la sismologie deux pingos sous-marins (en inuit, un *pingo* est une petite colline glacée en forme de cône) au fond de la mer de Kara, au nord de la Sibérie, à l'est de la Nouvelle-Zemble. Ces reliefs, que l'on découvre pour la première fois immergés, ont 70 et 1 000 mètres de diamètre. Ils seraient apparus récemment et trahiraient la fonte du pergélisol sous-jacent et donc la libération de méthane qu'il contenait.

Ce gaz (d'origine géologique ou biologique) était auparavant emprisonné sous la forme d'hydrates où des molécules d'eau forment des sortes de cages piégeant le méthane. Ces hydrates de méthane ressemblent à de la glace, qui s'enflamme facilement à mesure qu'elle fond. Ce comportement leur a valu de nom de « glace qui brûle ».

Le gonflement des pingos révèle que du gaz libre s'accumule progressivement et menace de faire éclater la structure à tout moment. Déjà, l'un des deux pingos serait très riche en méthane (plus de 120 000 parties par million selon les analyses d'échantillons, contre au plus 55 pour l'autre !), ce qui laisse présager une explosion imminente.

Ce type de mécanisme serait également à l'œuvre dans l'apparition subite de cratères profonds en Sibérie, notamment celui de 80 mètres de diamètre, en juillet 2014 dans

L'INSURGENTE *(à droite)* **fut capturée par les Américains avant de disparaître dans le triangle des Bermudes.**

la péninsule de Yamal, bordée par la mer de Kara. Le réchauffement climatique, qui dégèle le pergélisol, accentuera le phénomène.

Quel est le lien avec la disparition de navires ? Le méthane. Brutalement libéré, ce gaz diminue notablement la densité de l'eau (la poussée d'Archimède est réduite), ce qui serait fatal au bateau passant au-dessus. Qu'en est-il des avions ? Dans l'air, le méthane, en grande quantité, favoriserait les turbulences atmosphériques et perturberait les vols. Et justement, selon certains, la zone du triangle des Bermudes serait le siège de telles émanations. De fait, des programmes d'exploration ont mis en évidence des hydrates de carbone au fond de l'Atlantique.

Ce ne sont que des hypothèses – et nous avons vu que les chiffres n'indiquent aucune augmentation des disparitions dans le triangle des Bermudes –, mais quelques événements montrent qu'elles ne sont pas infondées.

Il y a une vingtaine d'années, le *Bavenit*, navire russe dédié à l'exploration des fonds sous-marins, se livrait à un forage dans la mer de Petchora, entre la Nouvelle-Zemble et la Sibérie. Soudain, un pingo relargua une grande quantité de méthane qui secoua le navire et le mit en péril. Dans ce cadre, les travaux de Pavel Serov montrent que l'exploitation des ressources énergétiques de l'Arctique ne sera pas sans danger et ce d'autant plus que la température de l'atmosphère augmente.

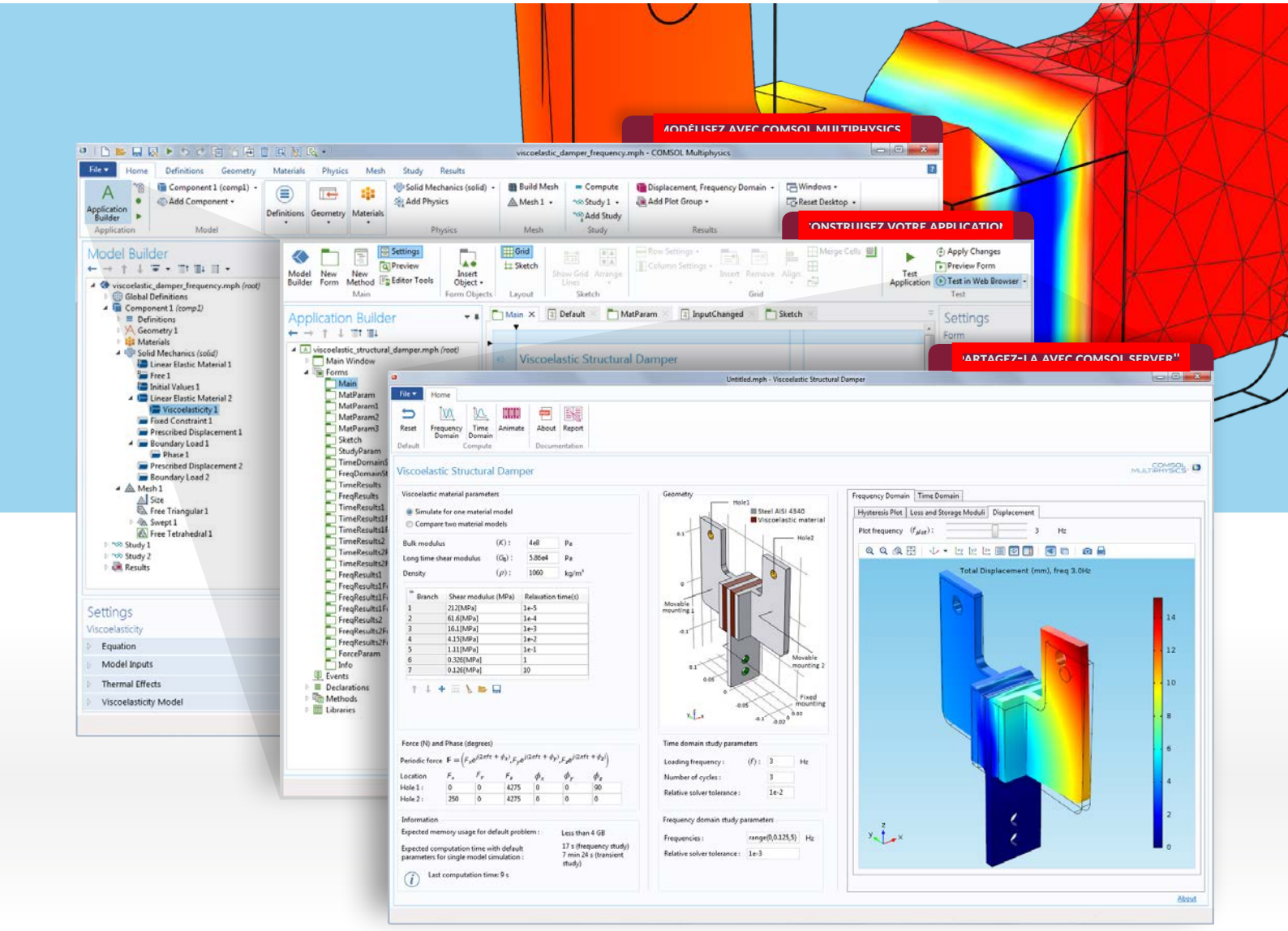
Autre exemple : un navire, intact, gît au fond de la mer, au centre d'une formation circulaire *(Le trou de la sorcière)*, à 150 kilomètres au large d'Aberdeen, en Écosse. Selon Alan Judd, géologue à l'université de Sunderland, en Grande-Bretagne, le bateau a eu la malchance de se trouver au mauvais endroit au mauvais moment, quand une poche de gaz a éclaté et libéré le méthane qu'elle contenait. Le *trou de la sorcière* est ce qui reste de la poche.

On peut aussi citer un bateau de la société Total qui aurait disparu de cette façon en Indonésie. Et l'*USS Insurgent* ? À vous de choisir : a-t-il été capturé par des extraterrestres ou coulé par des bulles de gaz ? ■

P. Serov *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 120, pp. 1515-1529, 2015.

COMSOL MULTIPHYSICS®

5.2 DISPONIBLE DES MAINTENANT



Du Modèle à l'Application, vers le Serveur

PARTAGEZ VOTRE EXPERTISE EN SIMULATION

COMSOL Multiphysics® et son Application Builder fournissent des outils pour concevoir facilement des interfaces personnalisées pour vos applications en multiphysique. Utilisez ensuite COMSOL Server™ pour partager vos applications avec vos collègues et vos clients dans le monde entier.

Pour en savoir plus sur vos applications en simulation, rendez-vous sur **comsol.fr**

© Copyright 2015 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server , LiveLink, and Simulation for Everyone 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

IDÉES DE PHYSIQUE

Comment gagner une course de bobsleigh

La gravité est le principal moteur du bobsleigh, mais le contrôle de la force centrifuge et de la glisse est essentiel pour optimiser les trajectoires.

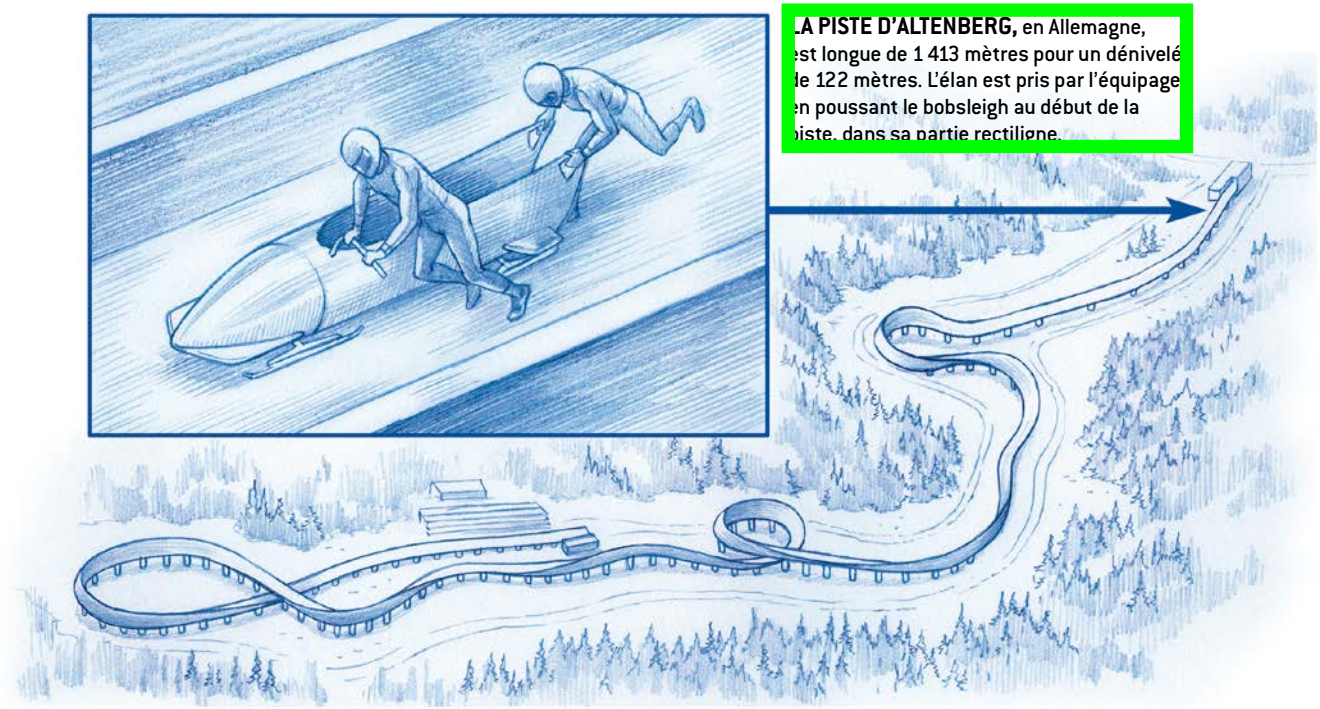
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une minute de glissade sans aucun freinage sur une piste étroite et verglacée, dont la pente dépasse 8 % en moyenne et peut atteindre 15 %, avec des vitesses de pointe de 140 kilomètres par heure et des accélérations ressenties allant jusqu'à 5 *g* (c'est-à-dire 5 fois l'accélération de la pesanteur) dans les virages : l'équipage des bobsleighs, à deux ou à quatre, est soumis à rude épreuve et pratique un sport dangereux ! Et après toutes ces sensations, c'est au centième de seconde qu'il faut départager les concurrents…

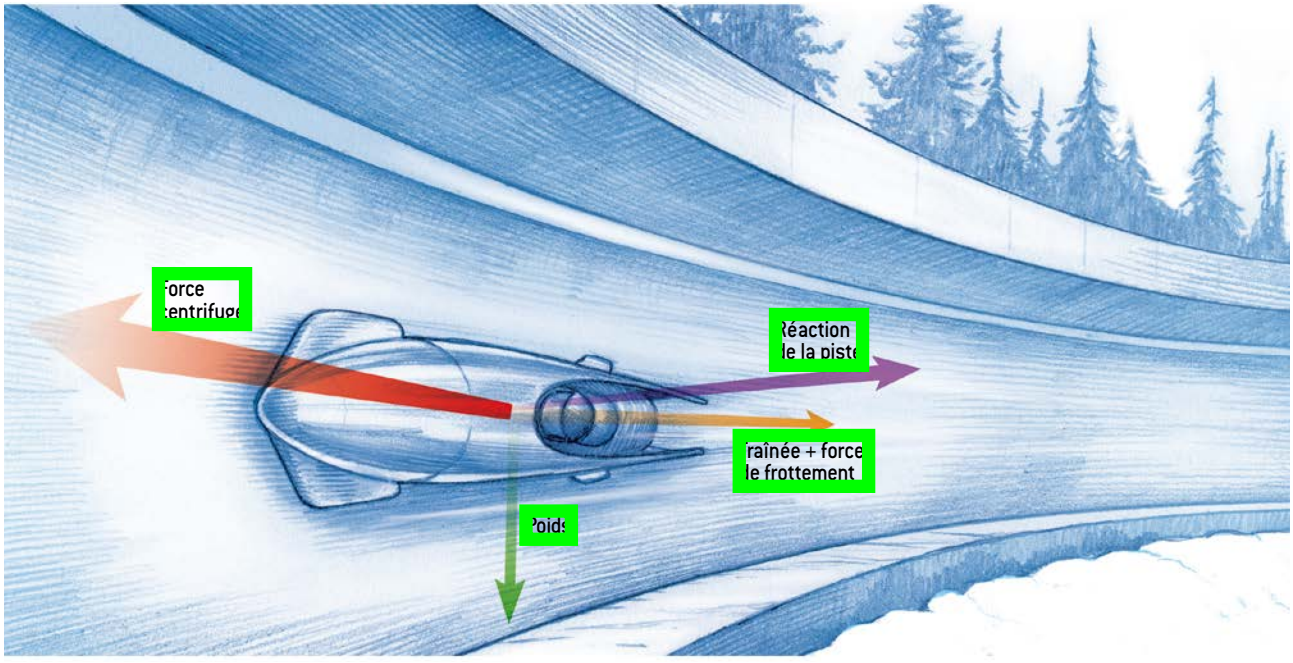
Les équipages ont peu de marge d'action

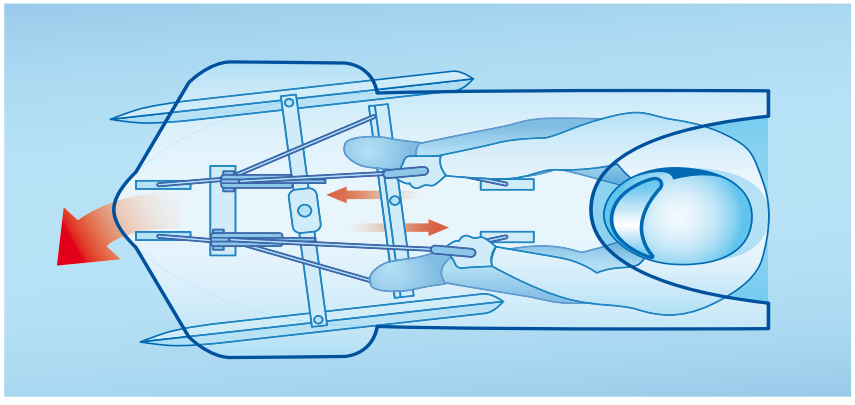
Ainsi, lors des Jeux olympiques de Sotchi en 2014, les 80 temps réalisés par les 20 premières équipes lors des 4 manches de la compétition étaient compris entre 54,82 et 56,25 secondes. Même si ces différences sont infimes, les résultats ne sont pas le fruit du hasard et les meilleurs équipages ont systématiquement quelques dixièmes de seconde d'avance sur leurs concurrents. Où vont-ils chercher ce minuscule avantage ? La marge d'action est limitée, mais la physique nous fournit des pistes et nous permet de mieux apprécier les performances.

Avant de nous intéresser à la trajectoire et au pilotage du bobsleigh, commençons par la vitesse. Après une poussée initiale sur les 50 premiers mètres de la piste, le seul moteur du bobsleigh est la gravité. En



LA PISTE D'ALTENBERG, en Allemagne, est longue de 1 413 mètres pour un dénivelé de 122 mètres. L'élan est pris par l'équipage en poussant le bobsleigh au début de la piste, dans sa partie rectiligne.





PLUSIEURS FORCES S'EXERCENT

Sur le bobsleigh, la force motrice étant le poids *(dessin du haut)*. Afin que le bolide ne soit pas déporté latéralement, il faut que la somme du poids et de la force centrifuge n'ait pas de composante latéralement à la piste. Pour ce faire, le pilote doit ajuster finement sa trajectoire et sa position sur la piste, donc son inclinaison. Afin de guider l'engin, il dispose de poignées et d'un système de poulies permettant de faire tourner les patins avant *(schéma ci-dessus)*.

négligeant les frottements des patins sur la glace et la traînée aérodynamique, le gain d'énergie cinétique lors de la descente est égal à la perte d'énergie potentielle de pesanteur. Si la vitesse initiale est nulle, la vitesse atteinte ne dépend alors ni de la masse de l'engin ni de la longueur parcourue, mais uniquement du dénivelé depuis le point de départ.

Prenons le cas du circuit d'Altenberg, en Allemagne *(voir la figure page précédente)*. La longueur de la piste est de 1 413 mètres pour un dénivelé de 122 mètres. On prévoit donc que le bob dépasse à l'arrivée les 175 kilomètres par heure (km/h). C'est plus que les maximums de 140 à 150 km/h mesurés ; cela signifie que les frottements jouent un rôle.

Cette première estimation nous permet aussi de comprendre pourquoi un bon départ est crucial. Le bob part à l'arrêt et les membres de son équipage commencent par le pousser dans une partie de piste de faible pente, puis embarquent l'un après l'autre avant que le bob ne soit trop rapide : la vitesse est alors proche de 40 km/h. S'affiche alors un temps intermédiaire, 50 mètres après la ligne de déclenchement du chronomètre, qui donne une indication sur la qualité du départ. Avoir le meilleur temps de départ signifie d'une part avoir une avance sur le temps final, d'autre part une vitesse plus élevée que les autres à l'issue de ces 50 mètres.

Limiter la traînée

À cause des faibles frottements, cet avantage en vitesse sera conservé tout au long du parcours et amplifiera même modestement l'avance initiale. Imaginons ainsi un temps de départ plus court de 0,1 seconde qu'un temps typique de 5 secondes mis pour atteindre au bout de 50 mètres une vitesse de 11 mètres par seconde (m/s). On calcule que le gain de vitesse serait de l'ordre de 0,22 m/s, ce qui se traduirait, si la piste d'Altenberg avait

une pente constante, par un gain supplémentaire de 0,25 seconde. D'où l'intérêt d'avoir un équipage puissant et coordonné !

Quant aux frottements, il y a d'abord celui de la glace sur les patins. Aujourd'hui, le règlement impose un même acier pour tous les concurrents. Le choix du profil des patins, en fonction de la piste et de la glace, est la seule marge de manœuvre. Il y a ensuite les forces de frottements aérodynamiques, c'est-à-dire la traînée. Dans ces régimes d'écoulement d'air, elle croît comme le carré de la vitesse et fait intervenir le maître-couple (l'aire de la section présentée par le bob et son équipage à l'écoulement) et un coefficient d'aérodynamisme. Or en dehors du pilote, les coéquipiers sont tête baissée dans le bob : on s'attend donc à très peu de différence dans ces quantités en fonction du gabarit de l'équipage.

Si la traînée est à peu près la même, la décélération associée est, elle, inversement proportionnelle à la masse. Plus l'équipage est lourd, moins elle sera élevée et meilleur sera le temps de parcours. C'est pourquoi, depuis 1952, la masse totale du bobsleigh et de son équipage est limitée selon les catégories. Ainsi, à Altenberg, le record est de 54,64 secondes pour le bob masculin à deux, limité à 390 kilogrammes, tandis qu'il est de 56,79 secondes pour le bob féminin à deux, limité à 340 kilogrammes.

En pratique, on s'appuie sur des mesures expérimentales pour évaluer ces forces de frottement et tenter d'améliorer les performances du bobsleigh. Typiquement, les décélérations de glissement sont inférieures à 0,005 g et les décélérations aérodynamiques sont de 0,03 g à plus de 30 m/s, sachant que l'accélération moyenne le long de la piste d'Altenberg est d'environ 0,086 g. L'optimisation aérodynamique est donc essentielle pour améliorer les performances.

Cependant, la vitesse n'est pas tout. S'il sait jouer avec le faible frottement sur la glace, le pilote a un rôle crucial, tant pour éviter l'accident que pour améliorer le temps. Les pistes de bobsleigh comportent de nombreux virages qui s'enchaînent. Avec des vitesses de 30 m/s et des rayons de courbure aussi petits que 20 mètres, on a des accélérations latérales de l'ordre de 4,5 g. Le frottement latéral d'un patin sur la glace ne peut exercer de force suffisante pour les compenser. Aussi la piste est-elle en forme de tube dans les virages, afin que le bob puisse s'incliner en remontant la paroi, de façon que la somme de son poids et de la force centrifuge soit perpendiculaire à la piste (et compensée par la réaction de la piste sur le mobile).

Un pilotage de précision

Pour une accélération de 4,5 g, il faut que le bob s'incline de 77 degrés par rapport à l'horizontale afin qu'il y ait compensation des forces latérales. Le pilote doit ainsi s'assurer que la hauteur du bob dans le virage, et donc son inclinaison, est celle qui permet d'éviter tout dérapage. S'il ne maîtrise pas cette montée, l'engin peut dépasser cette ligne d'équilibre, monter trop haut là où le poids l'emporte, au pire se renverser ou au mieux redescendre ensuite sous la ligne pour être repoussé par la force centrifuge, etc. Ces oscillations ne lui font pas seulement perdre un temps précieux. Elles se révèlent catastrophiques lorsqu'il retrouve une portion droite : le bob risque de cogner sur le bord de la piste, s'y frotter et perdre de la vitesse.

Le pilote doit s'assurer que la hauteur du bobsleigh dans le virage permet d'éviter tout dérapage

Notons que suivre la ligne d'équilibre des forces n'a pas que des avantages : cette ligne oblige à remonter en altitude, donc à perdre de la vitesse, et elle augmente par ailleurs la distance parcourue par rapport à une trajectoire plus basse. C'est pourquoi certains pilotes audacieux tentent de mordre la glace en prenant le virage plus serré : ils ralentissent plus, mais parcourent une distance plus courte dans la courbe. Des effets certes infimes, mais parfois décisifs : à Sotchi, après quatre manches, seuls 9 centièmes de seconde séparaient le premier du second. ■

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.jdphus.fr

BIBLIOGRAPHIE

L. Poirier, **Ice friction in the sport of bobsleigh,** thèse de doctorat, université de Calgary, 2011 (http://bit.ly/1mgmP1E).

D. Lewis, **Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh,** mémoire de Master de science, université technologique de Delft, 2006 (http://bit.ly/1SaYhng).

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

QUESTION AUX EXPERTS

Les variations de l'activité du Soleil influent-elles sur le climat ?

Oui, mais ces variations sont trop faibles pour expliquer le réchauffement actuel.

Thierry DUDOK DE WIT

Le Soleil est le principal moteur de notre climat : s'il s'éteignait brusquement, la température sur Terre s'effondrerait et la vie disparaîtrait presque totalement en quelques semaines. Les fluctuations de ce moteur expliqueraient-elles le réchauffement climatique constaté depuis les années 1950 ?

Pour le déterminer, on mesure l'activité solaire et les différents paramètres atmosphériques grâce à des instruments installés au sol ou sur des satellites, mais aussi grâce à des indices indirects. Ainsi, les variations de l'activité solaire modulent la production (globalement faible) d'éléments radioactifs dans l'atmosphère. Ces éléments se retrouvent piégés dans le bois ou les glaces polaires, ce qui permet de reconstituer le passé solaire sur plus de 11 000 ans. Depuis quelques décennies, on utilise aussi des modèles numériques pour mieux comprendre la physique à l'œuvre.

Autrefois considéré comme un modèle de constance, le Soleil s'est révélé un peu plus variable qu'on ne le pensait. La puissance du rayonnement reçue par la Terre varie selon des cycles de 11 ans, mais seulement de 0,1 %. Entre le milieu du XVIII[e] siècle et le début du XXI[e], une augmentation de l'activité solaire moyenne s'est superposée à ces cycles. Cependant, son amplitude n'est aussi que de l'ordre de 0,1 %. Trop peu pour changer le climat ?

Pas si vite : ne s'intéresser qu'à cette valeur, ce serait comme décrire la richesse d'un pays par son seul PIB. En effet, l'influence du Soleil sur le climat ne dépend pas uniquement de la quantité d'énergie reçue, mais aussi de multiples autres paramètres.

Parmi eux, le type de fréquences composant le rayonnement solaire. Si la lumière visible et infrarouge, qui représente plus de 92 % de la puissance émise, varie peu, la composante ultraviolette est plus versatile. Or son influence est amplifiée par divers phénomènes, telle son absorption par la haute atmosphère, qui se réchauffe. *In fine*, cela modifie la circulation des masses d'air puis le climat, mais l'effet est surtout local. La température globale ne varie que faiblement.

On a aussi soupçonné une influence du vent solaire, un flux de protons et d'électrons émis en permanence par notre étoile, car les variations de ce flux perturbent l'atmosphère *via* de nombreux mécanismes. Mais là encore, cet effet est trop faible pour expliquer le réchauffement.

La fausse piste du rayonnement cosmique

Enfin, le champ magnétique du Soleil dévie une partie du rayonnement cosmique (un flux de particules chargées issues des confins de l'Univers), modulant ainsi son intensité sur la Terre. Ce phénomène a été très médiatisé, notamment parce que les climatosceptiques l'ont invoqué pour expliquer le réchauffement. Ils s'appuient sur un mécanisme proposé en 1997 par les physiciens danois Henrik Svensmark et Eigil Friis-Christensen : l'interaction du rayonnement cosmique et de l'atmosphère produirait à basse altitude des ions favorisant la condensation de gouttelettes d'eau et amorçant la création de nuages. L'activité du Soleil ayant légèrement augmenté lors des dernières décennies, il dévierait une plus grande partie du rayonnement cosmique, ce qui réduirait la couverture nuageuse et favoriserait le réchauffement.

Pour tester cette hypothèse, le Cern a récemment monté l'expérience *Cloud*, qui vise à étudier en laboratoire l'impact du rayonnement cosmique sur la condensation. Les analyses ont confirmé cet impact, mais montré qu'il joue peu sur le climat. Bien trop peu pour expliquer le réchauffement actuel. En outre, l'activité solaire diminue depuis 2009, tandis que le réchauffement, lui, se poursuit.

Les interactions du Soleil et du climat sont, ainsi, extrêmement complexes. Si la haute atmosphère terrestre réagit fortement à l'activité solaire, les plus basses couches (qui sont au cœur de la question du réchauffement climatique) y sont nettement moins sensibles. Selon le dernier rapport du Giec, la part du Soleil dans le réchauffement observé depuis les années 1950 n'est que d'environ 3 %. Ni les modèles ni les observations ne lui attribuent un impact climatique majeur : celui des gaz à effet de serre reste, et de loin, la cause première du réchauffement actuel. ■

Thierry DUDOK DE WIT est professeur à l'université d'Orléans, où il est chercheur au Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

Offre Passion

1 AN - 16 n^{os} • 79€

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 retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement - 19 rue de l'Industrie - 67402 Illkirch Cedex

POUR LA SCIENCE

PAS460

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre "Passion"** incluant le magazine Pour la Science (12 n^{os}/an) + Dossier Pour la Science (4 n^{os}/an) :

❑ **1 an • 16 numéros • 79€** au lieu de ~~108€~~ **(P1A79E)**

❑ **2 ans • 32 numéros • 148 €** au lieu de ~~217€~~ **(P2A148E)**

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

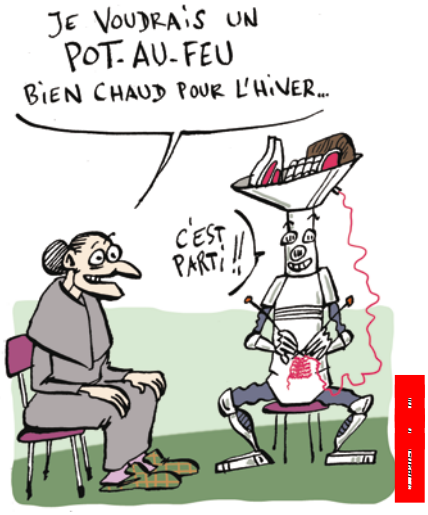
Signature obligatoire

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

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

Tarif valable uniquement en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger merci de consulter notre site. 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 valable jusqu'au 29.02.2016



SCIENCE & GASTRONOMIE

Mettez un électrofileur dans votre cuisine

En cuisine, la technique de l'électrofilage permettrait par exemple de confectionner des viandes artificielles.

Hervé THIS

Malgré quelques avancées, le monde culinaire reste techniquement très en retard par rapport à d'autres secteurs d'activité : la « cuisine moléculaire » se résume encore, souvent, à des siphons ou des pompes pour faire des mousses, des thermocirculateurs pour cuire à des températures fixes, des évaporateurs rotatifs pour produire des fractions odorantes, de la cryo-concentration pour produire des fonds.

Pourtant, que de possibilités inexploitées, pour peu que l'on aille regarder dans d'autres secteurs techniques !

L'industrie alimentaire, par exemple, a emprunté la cuisson-extrusion à l'industrie des polymères : en faisant passer de la « pâte » (un mélange aqueux de deux polymères du glucose, l'amylose, linéaire, et l'amylopectine, ramifié) dans des systèmes à vis d'Archimède dont le pas se resserre avant l'ouverture finale, on obtient un chauffage et une brusque détente de la pâte, ce qui produit les biscuits d'apéritif dont les rayons des supermarchés sont emplis. Ces appareils de cuisson-extrusion pourraient être miniaturisés et, pourtant, nos cuisines en sont encore dépourvues.

Un autre système qui trouverait sa place est l'électrofilage, qui permet de faire des structures variées, souvent filamenteuses. Son principe est fondé sur la modification de la surface d'un liquide dans un ajutage (bec de métal qu'on adapte à un tuyau, destiné à déterminer le volume et la forme du jet de liquide qui s'en échappe), quand on applique une différence de potentiel entre l'ajutage et une contre-électrode placée en vis-à-vis : en 1964, le physicien britannique Geoffrey Taylor a calculé que la surface du liquide prend une forme de cône et, si l'on augmente la différence de potentiel, un jet très fin est produit. Les instabilités dynamiques du liquide déforment ce jet en spirale.

Cette technique diffère peu de l'électronébulisation, où les forces électriques dispersent des gouttelettes d'un liquide. La différence tient dans l'intensité de ces forces et dans les forces de cohésion des liquides que l'on traite, lesquelles dépendent notamment de leur concentration en polymères dissous. Quand la concentration est élevée, une nano- ou microfibre se forme. En revanche, pour de faibles concentrations, des microparticules liquides sont dispersées, emportant des polymères en solution.

L'électrofilage permet d'obtenir des formes variées : fils, rubans, fibres ramifiées... Selon les conditions, le diamètre varie entre 5 nanomètres et 10 micromètres (à titre indicatif, les fibres musculaires de la viande ont des diamètres compris entre 10 et 100 micromètres).

En pratique, ce n'est pas difficile : il faut des différences de potentiel de l'ordre de 10 000 volts, bien plus que la tension du secteur, mais bien moins que les différences de potentiel qui, quand il fait sec en hiver, créent des décharges électriques dans nos cheveux ou dans notre pull-over.

Le débit ? Pour des fibres sans défaut, il doit être proportionnel au cube de la différence de potentiel appliquée, mais on pourra penser à un ordre de grandeur de 10 microlitres par minute. Le liquide ? Classiquement, l'électrofilage est utilisé pour des polymères de synthèse, mais des solutions de polysaccharides (pensons à l'amidon) ont été filées sans difficulté. Pour les protéines, l'électrofilage a semblé difficile, sauf pour la zéine en solution dans l'éthanol et pour la gélatine dans l'eau chaude ; mais Anneke Martin et ses collègues de la TNO (Organisation néerlandaise pour les applications des sciences) ont montré en 2014 que ces deux protéines peuvent en transporter d'autres, telle l'ovalbumine.

Evidemment, à raison d'un débit d'environ 1 gramme de fibre par heure, on est loin de nourrir l'humanité, mais ne pourrions-nous pas construire un système comportant de nombreuses seringues en parallèle, toutes actionnées par un seul grand piston, avec une source simple de tension électrique ? Le montage complet tiendrait sur une table et, en s'y prenant convenablement, on obtiendrait aussi bien des fibres pleines que des fibres creuses (à remplir avec un liquide goûteux), et l'on pourrait même tisser ces fibres. Gourmands, imaginez-vous cette sensation inédite d'un aliment tissé ? ■

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

C'EST POUR VOUS

France culture

LA MARCHE DES SCIENCES

DÉCOUVERTES INVENTIONS AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H

En partenariat avec POUR LA SCIENCE

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr

ZOOLOGIE

Ours - Esprits de la nature

Paul Nicklen

Delachaux & Niestlé, 2015
(208 pages, 29,90 euros)

L'ouvrage est aussi remarquable que le parcours de l'auteur. Ce dernier, photographe et biologiste canadien, a grandi auprès des Inuits et beaucoup côtoyé les peuples autochtones du Canada. Cela lui confère une sensibilité et une connaissance de la nature nord-américaine dont ce qu'il nous livre ici sur l'ours représente la quintessence. Faisant le portrait des différentes espèces nord-américaines – l'ours polaire, le grizzly, l'ours noir et l'ours Kermode ou ours-esprit –, il nous convainc en même temps de l'intérêt de préserver des milieux aussi particuliers que l'Arctique ou la grande forêt pluviale du Grand-Ours en Colombie britannique.

À quelques images de paysages grandioses s'ajoutent de nombreuses photographies rares d'ours, dont la prise n'aurait pas été possible si l'auteur n'avait une grande connaissance de ces animaux. Il est par exemple l'un des rares à avoir réussi des photographies sous-marines d'ours polaires. La plupart de ses clichés sont pris à quelques mètres, voire dizaines de centimètres, de ses modèles. L'auteur, qui a dû faire preuve d'une grande endurance au froid, à la pluie ou aux moustiques pendant ses affûts, est parvenu à saisir des comportements étonnants, tels ces ours bruns se délectant de saumons et de leurs œufs.

Sa connaissance intime des ursidés le pousse aussi à plaider contre leur dangerosité, anecdotique selon lui et le plus souvent provoquée par une imprudence humaine. Bien qu'ayant été guide de chasse sportif dans sa jeunesse, il fustige l'inutilité du massacre de tels animaux dont rien de bon ne peut sortir.

Le chapitre qui clôt l'ouvrage porte sur le plus rare des plantigrades : l'ours-esprit (sous-espèce endémique de l'ours noir, parfois au pelage crème). Jouant un grand rôle dans les croyances amérindiennes, cet ours se nourrit de saumons mais aussi des fruits de mer apportés par la marée. Il court des risques, ses territoires étant convoités par un transit d'hydrocarbures susceptible d'engendrer des marées noires. En donnant à voir le beau, l'auteur rend leur sens à tant de discours abstraits sur la nécessité de protéger la nature.

Farid Benhammou
Lab. RURALITES, Univ. de Poitiers

HISTOIRE DE LA MÉDECINE

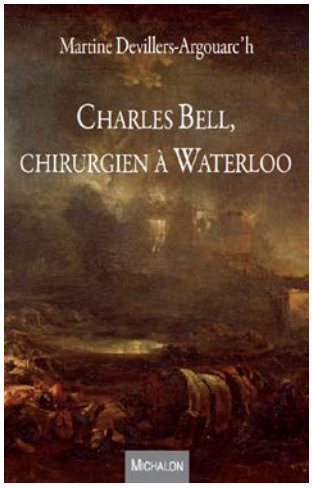
Charles Bell, chirurgien à Waterloo

Martine Devillers-Argouarc'h

Michalon, 2015
(296 pages, 20 euros)

Le 18 juin 1815, à proximité de Waterloo, a lieu la dernière bataille menée par Napoléon contre une coalition composée de Britanniques, d'Allemands, de Néerlandais et de Prussiens. Au bout de la journée, le bilan est terrible : 23 000 morts, 65 000 blessés, 4 000 disparus, 10 000 prisonniers français…

Débordés par le nombre de blessés, les chirurgiens de la coalition et particulièrement les Anglais font appel à leurs compatriotes. L'un des plus renommés d'entre eux, Charles Bell, franchit la Manche pour opérer et amputer les victimes de cette boucherie. Mû par



son ambition, Bell a pour objectif de faire une description clinique des blessures et d'en tirer des conclusions pratiques afin d'améliorer sa technique chirurgicale. L'un des intérêts, et non des moindres, de cet ouvrage est de ne nous épargner ni les corps déchiquetés, ni les méthodes d'amputation utilisées, détails que Bell, un artiste confirmé, saisit dans son carnet de croquis qui ne le quitte pas.

Bell découvre alors l'extrême misère des blessés français, entassés dans une ancienne caserne insalubre de Bruxelles et quasiment abandonnés. Profondément choqué, il saisit alors dans ses dessins l'expression des visages. Bouleversé, il se consacre à apporter soulagement et réconfort au corps et à l'âme de ces damnés. Un Henri Dunant avant l'heure ? En quelque sorte, même si Bell n'a pas fondé la Croix rouge.

Construit sur des faits réels, ce livre nous montre (autre grand intérêt du récit) la mutation d'un homme saisi par la violence de la réalité et l'inanité de la guerre. L'empathie qu'il finit par témoigner à ces soldats relativise sa recherche initiale d'une excellence professionnelle et de la reconnaissance par ses pairs. Et c'est restauré par l'humilité d'une humanité retrouvée qu'il peut rentrer en Angleterre et témoigner.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorien

ANTHROPOLOGIE

Une belle histoire de l'homme

Évelyne Heyer (dir.)

Flammarion-MNHN, 2015
(144 pages, 25 euros)

Cet ouvrage réalise une curieuse synthèse : il est à la fois beau livre et aide-mémoire. C'est d'abord un beau livre, de grand format. Toutes les pages sont illustrées, souvent par des photos d'objets appartenant au musée de l'Homme, à Paris : la parution du livre a accompagné la réouverture du musée en octobre 2015. Mais nombreuses également sont les photos de paysages, de groupes humains, de sites de fouilles, ainsi que les schémas explicatifs. Parmi ceux-ci, j'ai apprécié une carte de France montrant, du nord au sud, les variations dialectales d'une même phrase. On voit celle-ci se transformer du picard jusqu'au catalan en passant par diverses formes d'occitan. Les changements, d'une aire à une aire voisine, sont modérés, mais la différence entre le picard et le catalan est considérable !

Ce livre est aussi un aide-mémoire. Il recense une liste de questions que chacun peut se poser sur la nature, l'origine, l'avenir de l'Homme. Par exemple : l'Homme est-il une

espèce évoluée comme une autre ? D'où vient que nous sommes les seuls à parler ? Pourquoi sommes-nous différents ? Comment la culture agit-elle sur notre évolution ? Lucy marchait-elle comme nous ? Les premiers outils : quand, où, qui ? L'Homme est-il violent depuis les origines ? Y a-t-il une nature vierge ? L'Homme de demain sera-t-il un homme augmenté ? À quoi ressemblerons-nous (ou pas) dans le futur ?

À ces questions répondent une cinquantaine de spécialistes, qui pour la plupart sont anthropologues, préhistoriens ou généticiens. À part Maurice Godelier et Yves Coppens, dont les contributions ont quatre pages, tous les auteurs sont tenus de s'exprimer en deux pages. Ce calibrage strict ne leur laisse guère de place pour exposer nuances ou interrogations personnelles. Une telle uniformité donne à ce livre quelque chose d'un aide-mémoire.

Son titre de « belle histoire » ne doit pas tromper : loin d'être béat, il se fait l'écho d'inquiétudes actuelles répandues. « La médaille des progrès humains présente un large revers : un environnement dégradé et de nouveaux risques pour la santé », écrit ainsi J.-F. Toussaint. Un autre article ne cache pas ses réserves quant aux effets du tourisme de masse.

Les brèves descriptions de l'état du savoir sur les questions posées ne sont pas présentées comme des réponses définitives : les auteurs sont en recherche. Tant par ces questions que par la façon dont il les examine, ce livre peut entrer en résonance avec les interrogations adolescentes. Souhaitons alors qu'il éveille des vocations de préhistoriens et d'anthropologues.

Didier Nordon

ÉCOLOGIE

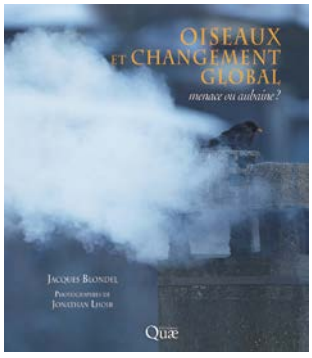
Oiseaux et changement global

Jacques Blondel (texte) et Jonathan Lhoir (photos)

Quæ, 2015
(144 pages, 26 euros).

La sortie d'un ouvrage de l'écologue Jacques Blondel est toujours un événement attendu. Cette livraison consacrée à l'impact des changements globaux sur les oiseaux n'échappe pas à la règle. Véritables sentinelles écologiques, les oiseaux sont des indicateurs pertinents dans l'étude de la façon dont l'environnement change. L'auteur présente une magistrale synthèse sur ce sujet complexe et controversé. Il identifie des espèces « gagnantes » et d'autres « perdantes ». Certaines d'entre elles, qualifiées de généralistes, prospèrent tandis que d'autres, les espèces « spécialistes », régressent.

L'auteur est sans concession quand il aborde la question de la disparition et de la dégradation des habitats, n'hésitant pas à dénoncer nombre d'horribles idées reçues, telle celle qui a conduit à mettre en place un plan d'éradication de l'ibis sacré. Cette espèce exotique avait été faussement accusée de concurrencer les oiseaux autochtones.



L'auteur rend aussi accessible certains concepts pourtant complexes de l'écologie. Il est bien aidé dans cet objectif par une magnifique iconographie, qui appuie toujours opportunément le propos. Insistons à cet égard sur le caractère considérant de certains clichés, tels celui d'un butor étoilé dans les roseaux, ou encore d'un gypaète barbu en vol…

Le bilan dressé par l'auteur est globalement pessimiste, car les changements environnementaux en cours créent plus de « perdants » que de « gagnants ». Il estime toutefois encore possible de sauver l'essentiel en mettant en œuvre des moyens adaptés de réhabilitation des écosystèmes. Le remarquable succès du retour des vautours dans nos montagnes illustre ce qui est à notre portée. Ce « beau livre » captivera tous ceux intéressés par les conséquences de l'action humaine sur l'environnement.

Jean-Philippe Siblet
MNHN, Paris

L'eau à découvert

Agathe Euzen, Catherine Jeandel et Rémy Mosseri (dir.)

CNRS Éditions, 2015
(368 pages, 39 euros).

Tout sur tous les aspects de l'eau ; en deux pages pour chaque aspect ; le tout fiable scientifiquement. Les directeurs de cet ouvrage ont réussi à en faire une référence accessible, ouverte et passionnante. Exemple ? On lit page 62 que l'eau est un milieu réactionnel industriel : en tant que solvant à température ambiante, elle est employée pour transformer la biomasse ; au dessus de 100 °C ou quasi critique, elle sert à déstructurer de la matière lignocellulosique ; supercritique, elle a encore d'autres emplois.

. Le sanglier et le satyre
II. Le satyre et le sanglier

Michel Sguaitamatti, Danielle Leibundgut Wieland et Rosina Leone

Akanthus, 2015
(232 et 196 pages, 74 euros).

Sur le plan scientifique, les deux auteurs ont réussi une tâche d'importance : rassembler sous une forme accessible, belle et systématique le matériel hétérogène et dispersé des vases plastiques hellénistiques, en d'autres termes des vases figuratifs de la Grande Grèce. Sur le plan esthétique, même si les images sont en noir et blanc, c'est un enchantement plein de découvertes. Ainsi ces touchantes représentations de visages noirs qui rappellent la présence des subsahariens parmi les esclaves des Grecs – une vieille injustice oubliée en somme.

L'avenir est pavé de bonnes intentions

Nicolas Carreau

Vuibert, 2015
(224 pages, 1790 euros).

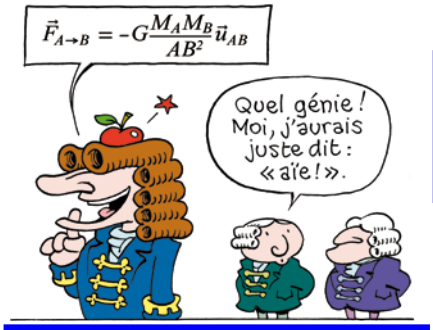
Et ce qui est pavé de bonnes intentions pourrait devenir l'enfer… L'auteur rassemble 30 « inventions géniales », discute de leur plausibilité, voire de leur réalité, avant de commenter avec une ironie froide l'avenir que nous préparent la machine de Nestlé à nous nourrir de pilules, le futur robot-acteur, les spectres hologrammatiques de *rock stars* décédées, les e-araignées censées repeupler notre maison désertée par les insectes en extinction, etc. De quoi rire ou frémir.

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

de Didier Nordon

DU NEUF AVEC DU VIEUX

Albert Szent-Györgyi écrivait : « La recherche consiste à voir ce que tout le monde a vu, et à penser ce que personne n'a pensé » (*Bioenergetics*, 1957, p. 57). Voilà qui est trop exclusif : il existe des terres vierges qui méritent d'être explorées. Reste que porter un regard neuf sur un objet connu est sans doute un exploit de plus grande valeur qu'analyser un objet neuf selon des procédures connues.



Cela ne vaut pas qu'en sciences. Bien des philosophes s'assignent le rôle du naïf qui, par ses questions ingénues, révèle que ce que tout le monde tenait pour allant de soi demande en fait qu'on y réfléchisse. Et dire d'un romancier qu'il écrit avec une grande économie de moyens est un beau compliment. Avec des mots et des constructions simples, à la portée de chacun, il suscite des émotions et obtient des effets que lui seul sait atteindre.

Ainsi, ces massifs distincts que sont les sciences, la philosophie, la littérature, ont en commun le sommet où se retrouvent les rares esprits auxquels il est donné de discerner l'original tapi au sein du banal.

PETITS AUTEURS UTILES

La notion de grand écrivain a beau être discutable, chacun de nous trouve grands certains écrivains, et moins grands certains autres. Paradoxe : les grands lecteurs ont besoin des petits écrivains autant que des grands, alors que les petits lecteurs peuvent se contenter des grands écrivains.

Si je passe mon temps à lire et si tous les auteurs me paraissent géniaux, je vais ne sentir écrasé. Ils me montrent combien mon esprit est faible, à côté du leur. Je serai moins affecté si les auteurs qui m'éblouissent sont rares. Les petits auteurs revalorisent les grands lecteurs. À l'inverse, imaginons que je lise peu. Les rares jours où la fantaisie me prend d'ouvrir un livre, autant qu'il me comble.

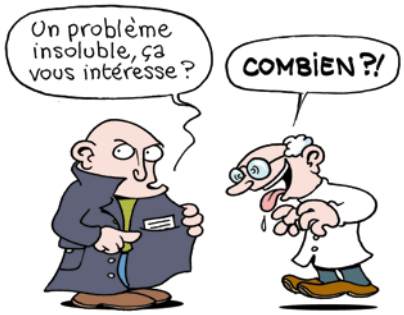
Se laisser emporter par les auteurs de génie est enthousiasmant, fréquenter des auteurs ordinaires, à notre image, est rassérénant. Les grands auteurs ne peuvent pas tout. Il y a des effets que seuls les petits réussissent.

TROP FACILE

Il est des phrases simples qu'on pourrait prononcer dans le feu de l'action sans remarquer qu'elles sont des palindromes. La mieux réussie, à mon goût : « Engage le jeu que je le gagne ! » À l'inverse, on doit à Georges Perec un palindrome tarabiscoté à l'extrême. Il débute par « Trace l'inégal palindrome. Neige. Bagatelle, dira Hercule… » et s'achève, quelques indigestes pages plus loin, par « … Haridelle, ta gabegie ne mord ni la plage ni l'écart. » Qu'on les préfère simples ou à la Perec, fabriquer ces textes réversibles est rudement difficile.

En revanche, fabriquer un nombre palindrome, même énorme, est enfantin. On écrit une série de chiffres, on la fait suivre de la même série prise à l'envers, et le tour est joué.

Voilà un cas où les mathématiques sont plus faciles que la littérature, concluront certains. Innocents ! Qu'ont fait les mathématiciens, sitôt qu'ils eurent introduit la notion de nombre palindrome ? Ils se sont posé des questions si difficiles qu'ils ne savent pas y répondre. Évidemment ! On ne les changera pas… Entre autres, ils ignorent s'il existe une infinité de nombres premiers palindromes.



L'homme ne se nourrit pas que de pain : il lui faut aussi de la difficulté. Quand une question facile se pose, il n'a de cesse d'imaginer comment la transformer en questions de plus en plus difficiles. S'il parvient à en formuler une qui soit carrément inextricable, là, il connaît enfin le bonheur.

LES MOTS QUI RASSURENT

Personne n'a peur d'un faisceau lisse, d'un schéma formel ou d'une tour de corps de classes – sauf ceux qui savent de quoi il s'agit. Ces termes anodins sont utilisés en mathématiques et exigent un travail âpre pour être compris.

Tout le monde a peur du dioxyde de titane, de l'acide malique ou du citrate de calcium – sauf ceux qui savent de quoi il s'agit. Ces termes revêches désignent des colorants et des conservateurs, d'origine naturelle, banals dans l'industrie alimentaire.

Les chimistes se plaignent d'être mal aimés. Mais être parfaits ou être aimés, il faut choisir ! Vouloir une nomenclature à la rationalité parfaite les mène à construire des termes rébarbatifs. Ils devraient s'inspirer des mathématiciens (ces bien-aimés…). Ceux-ci emploient des mots familiers, qui n'agressent pas l'oreille et qui, par glissement de sens, acquièrent une acception technique. Alors, puisque le dioxyde de titane est rouge, que les chimistes l'appellent rutile ! Puisque l'acide malique est présent dans beaucoup de fruits, qu'ils l'appellent cœur de fruit ! Et puisque le citrate de calcium est bon pour les os (à en croire les pubs), qu'ils l'appellent fortifiant osseux ! Nul ne s'inquiétera de voir des enfants se bourrer de friandises contenant du rutile, du cœur de fruit et du fortifiant osseux. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – Février 2016 – N° d'édition M0220460-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 205216 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé

Aix*Marseille université

Inserm
Institut national de la santé et de la recherche médicale

Inmed
Institut de neurobiologie de la méditerranée

A*Midex
Initiative d'excellence Aix-Marseille

MASTER DE NEUROSCIENCES - BRAIN MASTER PROGRAM

MOOC

NEUROPHYSIOLOGIE CELLULAIRE 1 :

COMMENT COMMUNIQUENT LES NEURONES

COMPRENEZ ENFIN LES BASES DE L'ÉLECTROPHYSIOLOGIE !

par Constance Hammond

DÉBUT DES COURS : 21 MARS 2016

DÈS DÉCEMBRE 2015 :

INSCRIPTIONS GRATUITES
SUR FRANCE UNIVERSITÉ NUMÉRIQUE :

www.france-universite-numerique-mooc.fr

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.

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

www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION : OLFA NEMSI