

■ POUR LA SCIENCE

Septembre 2014 - n° 443

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

DOSSIER L'Univers manquant

Matière noire, énergie
sombre : enquête sur
les 95 % cachés

M 02687 - 443 - F: 6,20 € - RD



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

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

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Sébastien Bohler

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapet

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib 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 :

Catherine Alix-Panabières, Sylvie Crasquin, Emmanuel Farge,

Barbara Ferry, Eitan Haddok, Évelyne Host-Platret,

Alexandre Marcowith, Yvan Pandelé, André Picot, Pierre Sokolsky

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

[j.f.guillotin@pourlascience.fr], assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science - 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti,

Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix,

Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. 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 tra-

duction, 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].



Maurice Mashaal

rédacteur en chef

L'Univers, cet inconnu

Invisible, impalpable, inodore... Et pourtant, elle existe ! C'est du moins ce qu'affirment la plupart des astrophysiciens à propos de la « matière noire », substance de nature inconnue qui représenterait environ 25 pour cent de l'énergie présente dans l'Univers.

Quant à l'« énergie sombre », elle n'est pas plus visible ni palpable que la matière noire... Et pourtant, selon les cosmologistes, cette forme d'énergie mystérieuse constituerait près de 70 pour cent du contenu du cosmos.

Faisons le compte : avec 25 pour cent de matière noire et 70 pour cent d'énergie sombre, il ne resterait que 5 pour cent de l'Univers dévolus à la matière ordinaire, celle qui nous entoure au quotidien, celle des planètes et des étoiles. Il est vertigineux de constater, après un siècle de cosmologie moderne, construite sur la base de théories robustes telles que la relativité générale d'Einstein et à l'aide de télescopes qui laissent voir les confins du monde, que 95 pour cent du contenu de l'Univers nous échappent !

Des hypothèses étranges qui résistent au rasoir d'Ockham

L'existence de la matière noire et celle de l'énergie sombre sont des hypothèses qui peuvent sembler étranges. Mais elles permettent de rendre compte de nombreuses données observationnelles, comme l'explique notre dossier (voir pages 21 à 45). Et, jusqu'ici, elles ont bien résisté au rasoir d'Ockham, ce principe fécond qui stipule qu'entre plusieurs hypothèses avancées pour expliquer un phénomène, il faut préférer la plus simple – à condition toutefois qu'elle soit prédictive. La compétition avec d'autres scénarios théoriques n'est pas gagnée pour autant. Pour cela, il faudra des confirmations directes, et des détecteurs s'y emploient. À moins que de nouvelles découvertes ne fassent trancher autrement le rasoir d'Ockham. ■

1 Édito

Actualités

4 Les arches de grès, nées sous pression



6 Rythmes biologiques : l'influence de l'alimentation
8 Comment les doigts se forment
9 Voir l'oxygène dans le cerveau

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 **Point de vue**
Autisme : pour une prise en compte de la neurodiversité
Fabienne Cazalis

14 **Entretien**
La biodiversité, une question de science... humaine ?
Jean-Denis Vigne

18 **Lu sur SciLogs.fr**
Ordem e progressio
Alexandre Moatti

19 **Homo sapiens informaticus**
Sommes-nous des enfants de bohème ?
Gilles Dowek

20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Pourquoi les réseaux sociaux nous rendent-ils malheureux ?
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science*, brochés sur la totalité du numéro
En couverture : © Maria Starovoytova / shutterstock.com

L'Univers manquant

DOSSIER

Matière noire, énergie sombre : enquête sur les 95 % cachés

À LA UNE

22 COSMOLOGIE Sur les traces de l'Univers invisible

Volker Springel

Dans l'Univers, la matière ordinaire n'occuperait qu'une place minime par rapport à deux composantes encore mystérieuses : la matière noire et l'énergie sombre. Les indices en faveur de l'existence de cette face cachée du cosmos se sont accumulés.

30 PHYSIQUE Les chasseurs souterrains de matière noire

Richard Taillet

Les physiciens recherchent les particules de matière noire à l'aide d'instruments installés dans d'anciennes mines. La sensibilité des détecteurs augmente et l'état se resserre autour de cette composante hypothétique de l'Univers.

38 COSMOLOGIE Énergie sombre ou nouvelle gravitation ?

Cédric Deffayet

L'expansion de l'Univers accélère. Pour expliquer ce phénomène constaté récemment, les théoriciens explorent plusieurs voies, telles l'existence d'une mystérieuse « énergie sombre » ou de nouvelles lois de la gravitation.

46 **ARCHÉOLOGIE** **Les Lucaniens, irréductibles Italiques**

Agnes Henning

Pour les Romains, les Lucaniens n'étaient que d'incultes guerriers montagnards. Ce n'est pas ce que révèlent les données archéologiques...



54 **NEUROSCIENCES** **Des champions de la mémoire**

James McGaugh et Aurora LePort

Certaines personnes se souviennent presque aussi bien d'événements vécus il y a plus de 20 ans que de ceux de la veille.



60 **TOXICOLOGIE** **Les solvants, dangereux même à faible dose**

Philip Bushnell

Des tests quantitatifs et d'autres études montrent que l'inhalation ponctuelle de solvants organiques n'est pas anodine, même à faible dose : elle diminue la réactivité des personnes exposées. Un problème sous-estimé.

Rendez-vous

70 **Histoire des sciences**

Anagrammes savantes

Étienne Klein

Au XVII^e siècle, Galilée, Huygens et d'autres scientifiques divulguaient leurs résultats sous la forme d'anagrammes pour marquer la priorité de leurs découvertes.

76 **Logique & calcul**

Promenades carrées et cubes collés

Jean-Paul Delahaye

La construction de polygones formés de carrés ou de polyèdres formés de cubes donne lieu à des énigmes originales, voire décoratives.

82 **Science & fiction**

Superman est-il une super-fourmi ?

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 **Art & science**

La première Voie lactée réaliste

Loïc Mangin

86 **Idées de physique**

Un microscope pour moins d'un euro

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

90 **Question aux experts**

Saurons-nous bientôt exploiter la fusion nucléaire ?

Christine Labaune

91 **Science & gastronomie**

Gels de matières grasses

Hervé This

92 **À lire**

96 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA
SCIENCE

Maintenant sur tablette et sur smartphone !

Téléchargez gratuitement
l'application « Pour la Science »

Un extrait du numéro
en cours de parution
vous est offert !

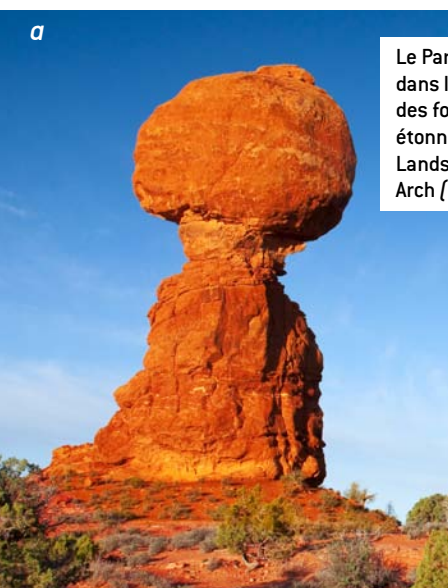


Le numéro du
Dossier Pour la Science
de l'été est enrichi

Disponible sur
Google play

Disponible sur
App Store





Le Parc américain des arches, dans l'Utah, contient des formations de grès étonnantes : Balanced Rock (a), Landscape Arch (b), Delicate Arch (c) et Turret Arch (d).



© Darren J. Bradley/shutterstock.com

Géosciences

Les arches de grès, nées sous pression

Sous l'effet du poids qui pèse sur elles, certaines parties de la roche deviennent plus résistantes à l'érosion que d'autres. C'est cette auto-structuration qui expliquerait la formation des arches.

Les ponts de grès du Parc américain des arches, dans l'État de l'Utah, semblent défier la gravité. Landscape Arch (b, ci-dessus), avec 89 mètres de longueur et 32 mètres de hauteur, est la plus grande arche naturelle du monde. Comment une telle structure se forme-t-elle ? Jusqu'à présent, les géologues supposaient que l'eau et le vent dégradaient les couches les plus friables de la roche, ne laissant que les plus résistantes. L'équipe de Jiri Bruthans, de l'Université Charles à Prague, a complété ce scénario en soulignant le rôle essentiel de la gravité : des pressions dues au poids de la roche renforcent la résistance à l'érosion de certaines zones du grès. Les chercheurs ont montré comment, avec ce modèle et des défauts initialement présents dans la roche, des arches se forment.

Le grès est un agglomérat de grains de sable liés par un ciment. Lors de sa formation, l'eau entre

les grains s'évapore. Les sels présents dans l'eau restent, cristallisent et forment un ciment qui assure une cohésion fragile de la roche. En raison de cette structure, le grès s'érode facilement sous l'action du vent et de l'eau.

Ainsi, un bloc de grès plongé dans de l'eau finit par se déliter totalement. Comment alors expliquer les structures spectaculaires observées dans la nature ? L'équipe de J. Bruthans s'est intéressée aux effets de la pression sur un bloc de grès. Cette pression apparaît naturellement du fait du poids de la roche, force qui agit verticalement.

Or si l'on applique avec un étau une telle contrainte mécanique à un bloc cubique de grès plongé dans l'eau, la partie extérieure du cube se délite, mais au centre une colonne résiste à l'érosion. Pourquoi ? Sous la pression, la cohésion entre les grains de sable du grès augmente.

Si la pression est bien répartie sur le cube, l'érosion continue d'agir sur toute sa surface. Mais à mesure que de la matière est arrachée au bloc, la pression se répartit sur moins de grès et la cohésion du matériau devient plus importante. Cette dernière devient alors suffisante pour que le grès résiste à l'érosion. Seules les aspérités, qui subissent moins de pression, sont érodées. Cela donne un aspect relativement lisse au grès, comme on peut l'observer dans la nature.

Ce mécanisme expliquerait par exemple la formation de Balanced Rock (a, ci-dessus) dont la partie supérieure a créé la pression nécessaire pour empêcher la colonne de s'éroder. J. Bruthans et ses collègues ont aussi simulé numériquement la répartition de la pression dans les blocs de roche et les résultats sont en accord avec les observations.

Mais comment naît une arche ? Les chercheurs ont montré que si le bloc de grès présente une fissure horizontale, ce défaut modifie la répartition de la pression

et peut conduire à la formation d'une telle structure. En effet, la pression est faible au-dessus et au-dessous de la fissure, mais forte à ses extrémités. L'érosion étant importante là où la pression est faible, la roche se creuse à ces endroits et finit par devenir une arche. Par le même type de raisonnement, J. Bruthans et ses collègues ont montré comment l'auto-structuration du grès peut former des alcôves ou des ensembles de piliers.

Sean Bailly

J. Bruthans et al., *Nature Geoscience*, en ligne le 20 juillet 2014



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

Paléontologie

Comment volait le plus grand oiseau connu ?

L'oiseau *Pelagornis sandersi* – qui appartenait au groupe disparu des Pelagornithidés – avait une envergure double de celle de l'albatros royal. Avec une telle taille, pouvait-il voler ? Daniel Ksepka, du Centre américain de synthèse évolutionnaire, à Durham aux États-Unis, a modélisé la forme de l'oiseau pour en étudier les capacités de vol.

Cet oiseau, qui aurait vécu il y a entre 25 et 28 millions d'années, se caractérisait par un bec muni de pointes osseuses et par de longues ailes. D. Ksepka a étudié un spécimen qui avait une envergure d'environ 6,4 mètres. À partir d'une simulation numérique, il a montré que *P. sandersi* planait probablement à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans avoir besoin de battre des



ailes. En effet, les turbulences qui apparaissent à l'extrémité de ces dernières et qui créent la force de traînée étaient de taille relativement faible en comparaison avec les dimensions des ailes. Ce mode de vol permettait à l'oiseau de limiter ses dépenses énergétiques lorsqu'il chassait des animaux vivant à la surface des océans.

Cependant, des ailes si grandes posent de nombreuses questions. Par exemple, comment l'oiseau faisait-il pour décoller du sol ou de la surface des océans ? Décollait-il comme un parapente, en dévalant une colline et en profitant des courants d'air ascensionnels ?

S. B.

PNAS, en ligne le 7 juillet 2014

Neurosciences

Gènes et intelligence... chez les chimpanzés

L'intelligence dépend de facteurs génétiques et environnementaux. Chez l'homme, les variations génétiques seraient responsables d'environ 50 pour cent des différences de quotient intellectuel (QI). Qu'en est-il chez nos proches cousins les chimpanzés ? Leurs capacités cognitives dépendent-elles du patrimoine génétique ? En partie, selon William Hopkins, de l'Université de Géorgie, et ses collègues, qui ont estimé que la part des facteurs génétiques dans les différences cognitives est aussi de 50 pour cent.

Les chercheurs ont fait subir une batterie de tests cognitifs à des chimpanzés, afin de quantifier diverses aptitudes : mémoire spatiale, capacités sociales, etc. Pour mesurer la mémoire, par exemple, ils montraient trois tasses opaques à un singe et remplissaient l'une d'elles, avant de les escamoter ; un peu plus tard, ils les disposaient à l'identique et le chimpanzé devait désigner celle qui était remplie.

Les éthologues ont également déterminé le degré de parenté des animaux (leur proximité génétique) en analysant leur génome. Puis ils ont synthétisé ces données pour évaluer la part de la variabilité des facultés cognitives due aux différences génétiques – en d'autres termes, la part d'héritabilité de ces facultés. Ils ont aussi examiné si d'autres facteurs, tels le sexe ou le fait d'avoir été élevé par des humains, étaient liés aux performances.

L'influence de ces deux derniers facteurs s'est révélée négligeable. En revanche, certaines capacités – mais pas toutes – avaient une grande part d'héritabilité, c'est-à-dire que les performances des chimpanzés étaient d'autant plus voisines qu'ils étaient proches génétiquement. Reste à déterminer les gènes et les mécanismes impliqués.

Guillaume Jacquemont

W. Hopkins et al., *Current Biology*, en ligne, 10 juillet 2014



Les performances des chimpanzés lors de tests cognitifs sont en partie déterminées par des facteurs génétiques.

Compter les ours polaires

La fonte de la banquise arctique motive le suivi des populations d'ours polaires, mais les régions concernées sont difficiles d'accès. Seth Stapleton, du Centre scientifique de l'Alaska, et son équipe ont étudié l'efficacité de l'imagerie par satellite pour recenser les ours en comparant la présence de points blancs (les ours) sur des clichés pris à différents instants. Ils ont testé leur méthode sur une petite île dans le bassin de Foxe, au Canada, où la population d'ours a été comptée par avion. Les estimations obtenues par les deux méthodes sont similaires.

La forme de la Lune

La Lune est légèrement aplatie, avec de légers renflements sur sa face visible depuis la Terre et sur sa face opposée. L'explication de cette forme est compliquée par les gigantesques cratères ou bassins d'impact qui parsèment le satellite. Ian Garrick-Bethell, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues, ont reconstitué la topographie lunaire en l'absence de ces bassins. Ils ont alors expliqué la forme obtenue par l'effet des forces de marée exercées par la Terre, qui auraient aplati la Lune, à l'époque où elle était chaude, puis provoqué l'apparition des renflements.

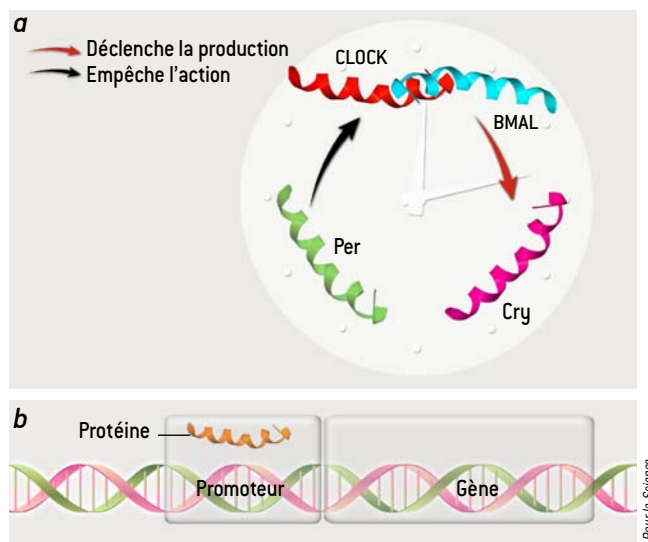
Les atouts du bio

Le bio est-il meilleur pour la santé ? Le débat fait rage. Plusieurs travaux récents ont conclu à l'absence de différence de valeur nutritionnelle. Cependant, une méta-analyse coordonnée par Carlo Leifert, de l'Université de Newcastle, apporte des arguments en faveur de cette pratique. Les chercheurs ont épluché 343 publications sur le sujet. Bilan : les aliments bio contiendraient davantage d'antioxydants – qui ont des effets bénéfiques pour la santé –, moins de métaux lourds toxiques et moins de résidus de pesticides.

Physiologie

Rythmes biologiques : l'influence de l'alimentation

L'insuline libérée à la suite des repas aiderait à synchroniser les horloges biologiques internes dans les tissus liés à la digestion.



Les horloges biologiques des vertébrés sont notamment fondées sur les fluctuations périodiques des concentrations de quatre protéines (CLOCK, BMAL, Per et Cry), qui s'influencent mutuellement (a). Les protéines CLOCK et BMAL déclenchent la production de Cry et Per, qui finissent par inhiber leur action en retour ; elles se dégradent ensuite, puis le cycle recommence. Pour déclencher l'expression d'un gène (et la production des protéines qu'il code), les protéines se fixent sur ses promoteurs, des segments d'ADN qui le précèdent (b).

Le corps vit au rythme d'horloges biologiques auxquelles sont notamment dus les cycles de veille-sommeil. Une horloge centrale, située dans le cerveau, coordonne les horloges périphériques, présentes dans presque tous les tissus. Selon les travaux de Miho Sato et Makoto Akashi, de l'Université Yamaguchi au Japon, et leurs collègues, s'alimenter agirait sur certaines de ces horloges périphériques en partie *via* l'insuline, l'hormone qui régule la concentration du glucose dans le sang.

Les horloges biologiques régulent l'activité cellulaire en modulant l'expression du génome. Elles consistent en des boucles de régulation moléculaire : divers gènes et protéines interagissent, s'inhibant ou se stimulant mutuellement, de sorte que les concentrations de certaines protéines oscillent. Or ces protéines dites d'horloge agissent sur de nombreux gènes liés à la physiologie, d'où un comportement cyclique de la cellule.

Le cycle est synchronisé par divers signaux externes. La

lumière cale l'horloge centrale sur un cycle de 24 heures, tandis que l'alimentation influe plutôt sur les horloges périphériques. De précédentes études sur des cellules en culture avaient révélé des interactions entre l'insuline et des gènes d'horloge, mais le rôle de l'hormone et la réaction des horloges restaient à préciser.

L'insuline est sécrétée par le pancréas en réponse à l'élévation de la concentration de glucose dans le sang, consécutive à la prise de nourriture. Les chercheurs ont modifié génétiquement des souris pour qu'elles produisent une protéine lumineuse attachée à une protéine d'horloge nommée Per, afin de suivre les oscillations de la concentration de cette dernière. À travers la peau de l'animal, ils ont ainsi observé quelques organes, tel le foie, devenir plus ou moins lumineux selon la quantité de protéines Per présentes.

Quand ils nourrissaient les souris ou leur injectaient de l'insuline, l'oscillation de la quantité de protéines Per se déphasait (le

cycle avançait ou reculait). Les chercheurs ont ensuite administré aux souris un composé qui bloque l'action de l'insuline en se fixant à sa place sur les récepteurs membranaires des cellules. Le déphasage observé lors du nourrissage était alors moins important. Ainsi, l'insuline serait l'un des vecteurs par lesquels l'alimentation influe sur l'horloge moléculaire.

Les chercheurs ont ensuite testé l'action de l'insuline sur des cultures cellulaires de différents tissus. L'hormone déphasait l'horloge moléculaire dans les cellules de foie et de tissu adipeux, mais pas dans celles de poumon ou de vaisseaux sanguins. Le foie et le tissu adipeux interviennent dans le métabolisme alimentaire. L'insuline placerait ces tissus, dont les cellules peuvent être à une phase quelconque de leur cycle au moment de la prise de nourriture, dans la phase la plus adéquate au traitement de celle-ci.

G. J.

M. Sato et al., *Cell Reports*, en ligne le 10 juillet 2014

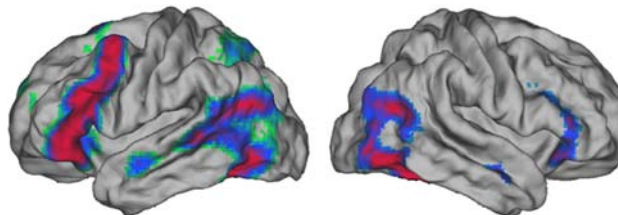
Neurosciences

Droitiers et gauchers traitent-ils le langage de la même façon ?

On sait depuis un siècle et demi que l'hémisphère gauche prédomine dans le traitement du langage. Il existe cependant des sujets pour qui, sans qu'on sache pourquoi, cette asymétrie est inversée : l'hémisphère droit est aux commandes. Encore plus intrigant, ces sujets neuro-atypiques ont un point commun : ils sont presque tous gauchers.

Chez ces sujets hors norme, l'hémisphère droit gère à la fois le langage et les activités manuelles, de même que chez les droitiers c'est l'hémisphère gauche qui prédomine. De là vient l'idée, communément admise, que préférence manuelle et dominance hémisphérique pour le langage sont biologiquement liées. Une hypothèse que Bernard Mazoyer et ses collègues, du Groupe d'imagerie neurofonctionnelle de l'Université de Bordeaux, ont souhaité mettre à l'épreuve.

Les chercheurs ont enregistré l'activité cérébrale de 300 sujets,



Chez les droitiers, les zones du langage (en couleurs) témoignent d'une nette dominance en faveur de l'hémisphère gauche (à gauche). C'est aussi le cas chez la plupart des gauchers.

dont la moitié de gauchers, en lien avec une tâche linguistique, et ont évalué leur préférence manuelle. Résultat : dans 99 pour cent des cas, la préférence manuelle n'a aucune influence sur le traitement du langage. Quelle que soit la main dominante, le langage est traité dans l'hémisphère gauche ou, plus rarement, n'est que faiblement latéralisé.

Le lien entre langage et préférence manuelle n'est avéré que chez les sujets neuro-atypiques, qui traitent le langage dans l'hémisphère droit. Ces personnes neuro-atypiques sont rares : d'après les résultats de

l'étude, elles ne représentent que sept pour cent des gauchers, soit moins de un pour cent de la population générale.

Si l'origine de cette étrange organisation cérébrale reste à ce jour inconnue, les performances cognitives normales des sujets neuro-atypiques et leur profil d'activité cérébral en miroir des sujets typiques excluent l'hypothèse d'un trouble neurodéveloppemental, explique B. Mazoyer. Les chercheurs privilégient une piste génétique.

Yvan Pandelé

B. Mazoyer et al., *Plos One*, en ligne le 30 juin 2014

© Groupe d'imagerie neurofonctionnelle (CHRS-CEA/Université de Bordeaux)

Nommer les exoplanètes

L'Union internationale d'astronomie lance un concours public pour nommer 305 exoplanètes. À partir de mars 2015, le grand public pourra voter pour les noms proposés par les clubs d'astronomie et par diverses associations. Les résultats seront officiellement validés à partir de juillet 2015. Rendez-vous dans un an ! Pour ceux qui veulent participer, tout se passe sur : <http://nameexoworlds.org/>

Dinosaures : plus de plumes

Sur la base de fossiles découverts en Sibérie, Pascal Godefroit, de l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique, avec des collègues de plusieurs pays, a décrit un dinosaure qui était partiellement recouvert de plumes. La nouveauté est qu'il s'agit cette fois d'un dinosaure ornithischien et non d'un membre des Théropodes, groupe dont les oiseaux sont issus. Cette découverte suggère que les structures de type plumes, pas nécessairement liées au vol, étaient bien plus répandues chez les dinosaures qu'on ne le pensait.

Chimie

Des fullerènes de bore

Les fullerènes ont été découverts en 1985. La plus connue de ces molécules sphériques de carbone est celle comportant 60 atomes, qui reproduit la structure de la surface d'un ballon de football. Elle a des applications en chimie et dans les nanotechnologies. Des variantes à plus ou moins d'atomes ont depuis été synthétisées, toutes constituées de carbone. Est-il possible de fabriquer des fullerènes avec un autre élément ? Une équipe de chimistes de l'Université Brown, aux États-Unis, et de trois universités chinoises vient de mettre en évidence l'existence de fullerènes formés de 40 atomes de bore.

Dans des travaux précédents, Lai-Sheng Wang, de l'Université Brown, et ses collègues avaient constaté que certains amas de 40 atomes de bore étaient stables. Mais ils n'avaient pas encore identifié la structure de ces molécules B₄₀.

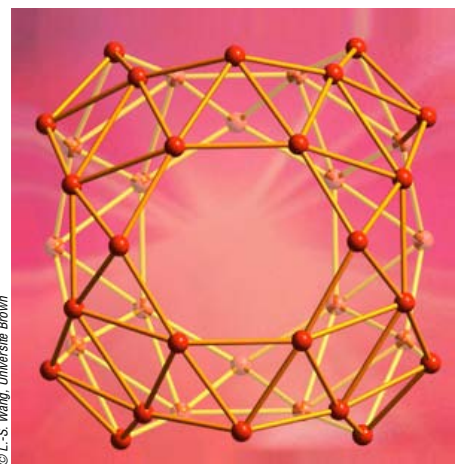
Pour ce faire, les chercheurs ont commencé par préparer un gaz d'atomes de bore, rapidement refroidi pour former de petits amas d'atomes. Les ensembles comportant 40 atomes ont été sélectionnés grâce à un spectromètre de masse.

Puis les chimistes ont mesuré le spectre des énergies de liaison de la molécule. Ce spectre est une

sorte d'« empreinte digitale » spécifique à chaque molécule. L.-S. Wang et son équipe ont ensuite simulé sur ordinateur 10 000 arrangements possibles de ces 40 atomes. Partant de ces modèles, ils ont calculé le spectre d'énergies de liaison associé à chaque structure. En comparant les spectres théoriques avec ceux obtenus expérimentalement, ils ont montré que des molécules stables de type fullerène comptant 40 atomes de bore s'étaient formées – des structures qu'ils ont nommées borosphérènes.

S. B.

Hua-Jin Zhai et al., *Nature Chemistry*, en ligne le 13 juillet 2014



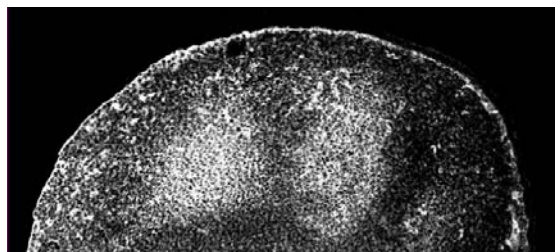
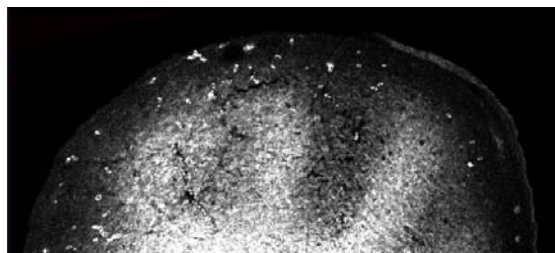
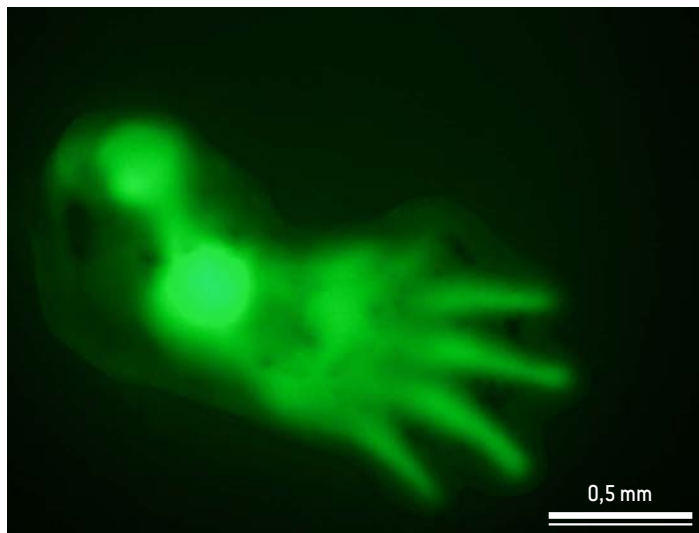
© L.-S. Wang, Université Brown

Le fullerène de bore comporte 40 atomes formant 48 triangles, 2 hexagones (un devant et un derrière) et 4 heptagones occupant les côtés.

Embryologie

Comment les doigts se forment

À l'instar des taches du pelage d'un guépard ou des couleurs des plumes d'un oiseau, les doigts pourraient naître d'une structure de Turing : un motif périodique chimiquement auto-organisé.



Chez l'embryon de souris, le squelette des doigts se dessine à partir du 11^e jour de gestation.

À gauche, un membre prélevé sur un embryon de souris de 11 jours et mis en culture pendant 48 heures exprime la protéine Sox9, impliquée dans la croissance des doigts, couplée à une protéine fluorescente.

La voie de signalisation Wnt, qui inhibe l'expression du gène de Sox9, est active entre les doigts (à droite en bas). Sox9 n'est ainsi détectée qu'au niveau des doigts (à droite en haut).

Comment apparaissent les doigts ? Jelena Raspopovic, de l'Université Pompeu Fabra à Barcelone, en Espagne, et ses collègues apportent des éléments de réponse. En combinant des expériences sur des souris et des modélisations informatiques, ils ont montré que les doigts pourraient résulter d'un mécanisme d'auto-organisation, dit de Turing, fondé sur la régulation mutuelle de trois protéines impliquées dans l'embryogenèse, BMP, Sox9 et Wnt.

Dès 1979, s'appuyant sur des simulations, Stuart Newman, du Collège médical de New York, et ses collègues avaient proposé, pour décrire la formation des doigts, un mécanisme de réaction-diffusion sur le modèle de celui imaginé en 1952 par Alan Turing. Le mathématicien britannique cherchait à expliquer, par une dynamique chimique, comment une organisation peut naître à partir d'un état homogène de la matière vivante.

Dans son modèle, deux substances chimiques – des morphogènes – diffusent à des vitesses différentes. L'une active la production de l'autre, qui inhibe celle de la première. Une perturbation aléatoire rompt l'équilibre, aug-

mentant localement la production de l'activateur. La concentration de l'activateur croît à cet endroit, formant un pic, ce qui augmente la production locale de l'inhibiteur. Celui-ci diffuse plus vite que l'activateur, dont il empêche la production dans un périmètre autour du pic. D'autres pics activateurs se forment plus loin, déclenchant à leur tour la production d'inhibiteurs, etc.

Depuis, ce modèle a été invoqué maintes fois pour décrire des structures du vivant telles que les taches du pelage des félins ou les motifs des plumes. En l'appliquant aux doigts, S. Newman s'oppose à l'idée d'une croissance déterminée par un processus purement génétique : une régulation spatiale de l'expression de certains gènes, inscrite dans le génome. Les publications en faveur de chaque hypothèse se sont multipliées, mais aucune n'a permis de trancher. En particulier, personne n'a pu identifier de candidats sérieux pour les morphogènes.

Or c'est ce que J. Raspopovic et ses collègues ont fait. Après quelques jours de développement embryonnaire, le gène de Sox9, un régulateur de la transcription

de gènes impliqués dans l'embryogenèse, est exprimé dans le bourgeon du membre selon un motif périodique correspondant aux futurs doigts. Les biologistes ont montré que cette protéine constitue un bon candidat : sa production semble régulée par un mécanisme d'auto-organisation et elle contrôle l'organisation périodique d'autres protéines. Par ailleurs, la voie de signalisation déclenchée par BMP est très active dans les régions des futurs doigts, où elle favorise l'activité de Sox9, tandis que Wnt produit un signal plus fort entre les doigts, lequel inhibe l'expression du gène de Sox9 et la formation du cartilage.

Forts de ces résultats, les biologistes ont imaginé un modèle de Turing à trois morphogènes : la voie Wnt inhibe l'expression du gène de Sox9 entre les futurs doigts, tandis que la voie BMP la stimule dans les régions qui formeront les doigts. En retour, Sox9 régule ces deux voies. Ce modèle fournit bien un motif conforme aux observations... Reste à vérifier qu'il est robuste.

Marie-Neige Cordonnier

J. Raspopovic et al., *Science*, en ligne le 1^{er} août 2014

Chimie

L'esprit de l'ambre se dévoile

Avec ses couleurs chaudes et ses reflets dorés, l'ambre est utilisé pour confectionner des bijoux depuis la Préhistoire. Cette résine de conifère polymérisée et fossilisée est aussi appréciée par les paléontologues, car elle abrite parfois des animaux piégés il y a des millions d'années et préservés depuis des agressions de l'environnement.

Cette résistance est cependant un inconvénient pour étudier la structure de l'ambre. En effet, la méthode classique requiert une étape de chauffage – ou pyrolyse – qui détruit la structure des macromolécules de l'ambre, si bien qu'il devient impossible de savoir comment ces molécules sont liées.

Jennifer Poulin et Kate Helwig, de l'Institut canadien de conservation, ont modifié l'étape de pyrolyse : le matériau est chauffé à 450 °C au lieu de 480 °C dans la méthode standard et, surtout, cette température est atteinte plus lentement.

Par cette méthode, les chercheuses ont étudié deux types d'ambre qui contiennent de l'acide succinique (aussi nommé « esprit de l'ambre »). Elles ont confirmé l'hypothèse selon laquelle cet acide participe à la réticulation de l'ambre, c'est-à-dire à l'établissement de liaisons entre macromolécules pour former un réseau tridimensionnel robuste.

S. B.

J. Poulin et K. Helwig, *Analytical Chemistry*, en ligne le 19 juin 2014

Insolite

Une couvaison de 4,5 ans !

Des chercheurs de l'Institut de recherche aquatique de la baie de Monterey, aux États-Unis, ont suivi un poulpe femelle, de l'espèce *Graneledone boreopacifica*, qui s'est occupé de sa ponte (160 œufs) pendant quatre ans et demi entre 2007 et 2011. Ce record de durée de couvaison montre un étonnant compromis évolutif entre, d'un côté, les bénéfices procurés par un développement des petits au sein d'un œuf et la protection de la mère et, de l'autre, le manque de temps dont dispose cette dernière pour s'alimenter.



Médecine

Voir l'oxygène dans le cerveau

Une équipe grenobloise a développé une technique pour cartographier l'oxygénation cérébrale avec les appareils d'IRM actuels. Cette technique pourrait servir dans divers cas, notamment lors d'accidents vasculaires cérébraux (AVC) et de traumatismes crâniens. Emmanuel Barbier, qui a dirigé son développement, nous explique son principe et ses enjeux.

Pourquoi cartographier l'oxygénation cérébrale ?

Emmanuel Barbier : Lors d'un traumatisme crânien ou de certains types d'accident vasculaire cérébral, la circulation sanguine peut s'interrompre par endroits, privant d'oxygène certaines zones du cerveau. Dans le premier cas, le cerveau gonfle localement et finit par s'auto-asphyxier ; dans le second, un caillot se forme. Il faut alors réagir vite : lors d'un AVC, près de deux millions de neurones meurent chaque minute.

Notre méthode permet d'estimer l'étendue et la progression des zones hypoxiées (manquant d'oxygène), où les neurones sont menacés. C'est un paramètre capital pour décider de l'opportunité d'une intervention, qui sera lourde : médicaments (entraînant des effets secondaires) contre les caillots dans le cas d'AVC, ouverture locale du crâne pour laisser gonfler le cerveau dans celui de traumatismes crâniens. Notre méthode permet aussi de tester l'efficacité des traitements contre les maladies et accidents impliquant des zones hypoxiées.

Qu'utilise-t-on aujourd'hui ?

E. B. : En matière de cartographie, la technique de référence actuelle est la tomographie par émission de positrons : on envoie de l'oxygène radioactif vers le cerveau et on suit son devenir. Cette méthode est invasive, chère et compliquée. Elle est donc très peu utilisée.

On mesure plutôt l'oxygénation en insérant une sonde dans le cerveau. Mais cela nécessite une intervention chirurgicale lourde et ne donne qu'une valeur locale.

Quel est le principe de votre technique ?

E. B. : Le sang qui circule dans les zones hypoxiées via les quelques

vaisseaux opérationnels est vite appauvri en oxygène, car il irrigue de nombreuses zones. Or le sang peu oxygéné est plus aimanté que le sang oxygéné, et cette différence est détectable avec les appareils d'IRM actuels. Nous avons donc élaboré des méthodes de traitement du signal qui permettent de remonter à la cartographie de l'oxygénation cérébrale à partir des signaux renvoyés par un tel appareil.

Où en est le développement ?

E. B. : Nous avons d'abord validé la technique par des simulations. Les travaux que nous venons de



Emmanuel Barbier est directeur de recherche à l'Inserm (U836).

publier concernent des tests sur des rats, que nous avons privés d'oxygène de différentes façons, notamment en reproduisant les accidents dont nous avons parlé. Nous avons alors cartographié leur oxygénation cérébrale et vérifié les résultats de diverses façons : implantation de sondes, marquage des tissus par un produit dont la couleur varie en fonction de l'oxygénation, etc. Des tests sont déjà en cours chez l'homme, mais il faudra encore du temps. Au mieux, notre technique sera disponible dans dix ans.

G. J.

T. Christen et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, 9 juillet 2014

Fragrances de gorille

Les effluves musqués des gorilles pourraient participer d'un système de communication olfactive, d'après deux primatologues de l'Université de Stirling, en Écosse. En suivant un mâle dominant à la tête d'un groupe de gorilles des plaines de l'Ouest, en Centrafrique, elles ont observé que son odeur variait du très intense – lors des confrontations avec d'autres mâles – au léger – lorsqu'il voulait fuir le conflit et rassurer son groupe. L'odeur corporelle servirait ainsi à communiquer des informations à l'entourage.

Salut antibactérien

Le « check », ou salut « poing contre poing » est une vingtaine de fois moins contagieux que la poignée de mains virile. En jeu, notamment : la surface de contact entre les deux mains. Pour le montrer, David Whitworth et ses collègues, à l'Université d'Aberystwyth, en Grande-Bretagne, ont comparé le nombre de bactéries transférées lors de salutations, en prenant soin de tremper auparavant leur main (gantée...) dans une solution de bactéries fécales communes. Le « check » emporte les suffrages des chercheurs.

Géophysique

Une pluie de fer sur la Terre primitive

Dans les derniers millions d'années de sa formation par accréation, la Terre a été bombardée par des météorites qui l'ont fait fondre sur des centaines de kilomètres d'épaisseur. Cela a donné naissance à un océan de magma. Le fer contenu dans le cœur des plus grandes météorites a coulé vers le centre de la Terre, traversant cet océan magmatique pour rejoindre le noyau.

La façon dont le fer a fondu et migré a influé sur les abondances de radio-isotopes utilisées pour dater la formation de la Terre. Le scénario qui prévaut pour décrire cette migration du métal est celui de la « pluie de fer » : les noyaux météoritiques de fer se seraient fragmentés en gouttes sphériques, toutes de même taille. Une équipe regroupant des chercheurs du CNRS, de l'Université de Nantes et de l'Université de Californie à Los Angeles a testé ce modèle en laboratoire.

Le modèle simple de la pluie de fer, proposé en 2003, soulève des questions. Il ne tient pas



Une chute de gallium dans un liquide, simulant celle du fer dans l'océan magmatique primordial.

compte du rapport de viscosités entre le fer et le magma, et des simulations numériques ont

montré que les gouttes devraient avoir des tailles variées. Michael Le Bars et ses collègues ont mis en place une expérience pour recréer la pluie de fer en laboratoire et étudier le rôle de la viscosité des différents éléments.

Dans un récipient cylindrique, un mélange d'eau et de glycérol simule le magma visqueux. Le fer est remplacé par du gallium, métal qui a l'avantage de rester liquide à température et pression ordinaires. Les chercheurs ont constaté que lorsqu'une boule de gallium se déverse dans le récipient, elle se fragmente en coulant, comme dans le modèle de la pluie de fer. En revanche, les gouttes présentent une grande diversité de tailles et de formes. Et elles fusionnent et se fragmentent en permanence. Le modèle de la pluie de fer nécessite donc une bonne révision.

S. B.

Earth and Planetary Science Letters, vol. 403, pp. 236-245, 2014

Archéologie

Les inconnus de l'Atacama

Les marges des déserts sont le berceau de cultures. Un phénomène illustré une fois de plus par la découverte d'une culture inconnue dans le delta de la rivière Tambo, au Nord du désert de l'Atacama, au Pérou. Plus de 150 tombes datant du VII^e au IV^e siècles avant notre ère ont été découvertes par les archéologues polonais, péruviens et colombiens du projet européen Tambo, dirigé par Józef Szykalski, de l'Université de Wrocław. Elles témoignent d'une culture qui, dans la région, a précédé celle de Tihuanaco (-300 à 1000).

Ces tombes et le matériel funéraire qu'elles renfermaient

sont intacts, car la nécropole n'était pas exposée en surface. L'aridité extrême qui règne dans l'Atacama a préservé une grande part des matières organiques. Ainsi, certains des corps étaient encore enveloppés de nattes, de lindeux de coton ou encore de filets de pêche, ce qui montre au passage que la pêche faisait partie des activités de subsistance de la population locale. D'épaisses coiffes en laine de camélidés auraient eu la fonction de casques.

Cette interprétation guerrière est confortée par la présence, dans certaines tombes masculines, de massues se ter-

minant par des masses de pierre ou de cuivre. Selon J. Szykalski, il s'agirait d'objets de prestige, qui attestent de la présence de l'élite dans la nécropole. Plusieurs défunts ont aussi été retrouvés accompagnés d'arcs et de carquois remplis de flèches à pointes d'obsidienne (un verre volcanique). C'est d'autant plus remarquable que les témoignages d'arcs sont très rares au Pérou. Autre détail intéressant : le squelette d'un jeune lama montre que l'introduction dans la région de ce camélidé domestique est plus précoce qu'on ne le pensait.

François Savatier

<http://projet-tambo.archeo.uni.wroc.pl/gb/>



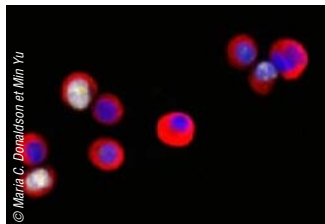
Projet Tambo, Université de Wrocław

Les roseaux fixés aux oreilles de ce défunt de la culture de la rivière Tambo, au Nord de l'Atacama, dépassaient à l'origine de sa tombe. Servaient-ils à communiquer avec les vivants ?

Médecine

Cancer : à la recherche des cellules circulantes

L'un des principaux obstacles au traitement du cancer est l'apparition de métastases dans les organes vitaux du patient. Cette propagation est le fait de cellules qui se détachent de la tumeur primaire et circulent dans les vaisseaux sanguins ou lymphatiques pour se fixer dans de nouveaux tissus et y former d'autres tumeurs. Étudier le patrimoine génétique de ces cellules tumorales circulantes, qui ont développé des résistances au traitement de la tumeur primaire, aiderait à adapter le traitement. Mais il faut pour cela les isoler et les cultiver – une tâche ardue, notamment en raison de leur faible concentration dans le sang, inférieure à une cellule par million. Min Yu, de la Faculté de médecine de Harvard, aux États-Unis, et ses collègues ont réussi à mettre en culture de telles cellules prélevées dans le sang de patientes atteintes d'un cancer du sein métastatique (*ci-contre en microscopie à fluorescence*).



La méthode de tri usuelle est immunomagnétique : marquées par des anticorps liés à des billes métalliques, les cellules sont ensuite déviées magnétiquement et ainsi isolées. Toutefois, peu de cellules sont récupérées et, une fois mises en culture, elles ne prolifèrent pas toutes. Pour améliorer la sensibilité de la technique, les chercheurs ont employé un dispositif microfluidique : le sang passe par un circuit micrométrique, ce qui augmente les chances que des cellules rencontrent les anticorps et soient isolées.

Pour trois lignées de cellules cultivées, les biologistes ont ainsi établi une carte de sensibilité des cellules tumorales à différents médicaments. Sous réserve que la mise en culture s'améliore, la méthode aiderait à adapter le traitement au profil génétique du cancer du patient, et ce de manière non invasive.

Y.P.

M. Yu et al., *Science*, en ligne, 11 juillet 2014

Astrophysique

Un point chaud cosmique

La Terre est constamment bombardée par des rayons cosmiques, des flux de particules qui circulent dans le milieu interstellaire. Gordon Thomson, de l'Université de l'Utah, et une équipe internationale d'astrophysiciens ont étudié la provenance des particules cosmiques les plus énergétiques avec le *Telescope Array* (le réseau de détecteurs le plus étendu de l'hémisphère Nord dédié à la recherche de rayons cosmiques, situé aux États-Unis).

L'obstacle principal dans une telle étude est que les particules cosmiques – principalement des protons – sont déviées par les champs magnétiques qu'elles rencontrent sur leur trajet, de sorte qu'il devient impossible de déterminer leur origine. Cependant, plus une particule a une énergie élevée, plus cette déviation est faible. G. Thom-

son et son équipe se sont donc concentrés sur les rayons cosmiques les plus énergétiques (plus de $5,7 \times 10^{19}$ électronvolts), mais ceux-ci sont d'autant plus rares. Les chercheurs n'en ont ainsi détecté que 72 en cinq ans.

Ils ont toutefois observé un « point chaud », une région du ciel d'un diamètre de 40 degrés. Dix-neuf particules ont été enregistrées en provenance de cette région ; or avec une répartition aléatoire, cette région n'aurait dû en émettre que quatre ou cinq.

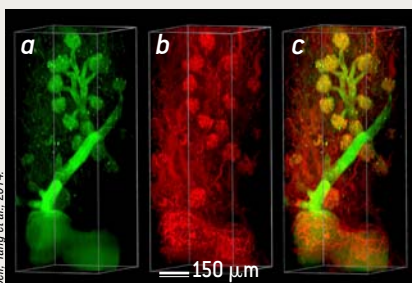
Le point chaud n'est pas loin du plan supergalactique, plan qui regroupe plusieurs super-amas de galaxies, mais les données sont encore insuffisantes pour identifier précisément la source de ces rayons cosmiques.

S.B.

R. U. Abbasi et al., *Ap. J. Letters*, vol. 790(2), L21, 2014

Rendre le corps transparent pour visualiser les organes

Comment visualiser la structure des organes sans endommager les tissus ? L'équipe de Viviana Grandinaru, de l'Institut de technologie de Californie, a amélioré une méthode consistant à injecter des hydrogels dans l'organisme pour stabiliser les tissus, rendus transparents avec des détergents. Une image en trois dimensions est alors obtenue par microscopie confocale. L'exemple ci-contre montre un détail de rein de souris vu avec deux marqueurs fluorescents (a, b) et les deux images superposées (c).



Cell. Yang et al., 2014.

Le bruit des bateaux nuit

Le bruit des bateaux perturbe la communication et le sens de l'orientation chez les animaux marins. Sophie Nedelec, de l'Université de Bristol, et ses collègues ont montré qu'il affecte aussi le développement embryonnaire et augmente la mortalité des larves du lièvre des mers, un gastéropode des récifs coralliens polynésiens.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr