SCIENCE

JUSTICE : quelle place pour les neurosciences dans les procès ?

POUR LA

SCIENCE

Octobre 2012 - n° 420

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les trous noirs

Ont-ils rendu possible la vie sur Terre ?

Pénurie d'hélium
Un gaz rare...
devenu trop rare

Le rythme des langues
Lent ou rapide, il assure
un même débit d'information

Portfolio 3D Lunettes fournies

Termites et fourmis

Explorez les nids de ces insectes sociaux reconstitués en 3D par des techniques tomographiques

M 02[illegible] 420 F: 6,20 €

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

CASDEN, la banque de l'Éducation, de la Recherche et de la Culture

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance

casden

BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine

notre identité reflète

nos valeurs

Un réseau de Chargées de Relation Enseignement Supérieur et Recherche à votre disposition

■ Coordonnées disponibles sur www.casden.fr

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. **01 55 42 84 00**

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet
Marketing : Élise Abib
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Françoise Combes, Didier Demolis, Mohammad Heydari-Malayeri, Évelyne Hostalatret, Nunzio Lanotte, Philippe May, Christophe Pichon, Patrice Pomey, Sevket Sen, Rossana Tazzioli, Jean-Philippe Uzan.

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffard. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Adresse postale :
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse [illegible]
Québec, H3N 1V3 Canada.
Suisse : Servidis, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Casterman : 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 : Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President : Steve Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.

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.

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 2011

Magie et complexité

« Même quand nous comprenons ce [que les magiciens] font, le processus par lequel ils y sont arrivés nous est inaccessible. Ils n'ont que très rarement, voire jamais, d'élèves, car [...] il doit être terriblement frustrant pour un jeune esprit brillant d'être confronté aux voies impénétrables de l'esprit d'un magicien. Richard Feynman est un magicien d'un niveau exceptionnel. »

Pourquoi Richard Feynman, qui, en 1965, partagea le prix Nobel de physique avec Julian Schwinger et Sin-Itiro Tomonaga, fut-il qualifié de magicien par le mathématicien Mark Kac qui travailla avec lui ? Un magicien réalise ce qui semble impossible avec une apparente facilité. C'est ainsi qu'avec ses colauréats, il travailla à l'élaboration de l'électrodynamique quantique, théorie qui décrit l'interaction électromagnétique des particules chargées. Pour ce faire, il élabora notamment des figures – les diagrammes qui portent son nom – permettant de représenter et de calculer ces interactions. Toutefois, aussi puissants soient-ils, les diagrammes de Feynman sont devenus insuffisants pour traiter, par exemple, la complexité des interactions des particules dans le LHC, le grand collisionneur de hadrons. Une nouvelle méthode, dite d'unitarité, prolonge celle de Feynman *(voir Boucles et arbres, à la recherche d'une nouvelle physique, page 72)*.

La complexité est parfois un atout.

Mais la complexité est parfois un atout, car des propriétés nouvelles peuvent en émerger. C'est le cas notamment dans les sociétés d'insectes sociaux – fourmis ou termites, par exemple –, où le chaos semble régner, mais d'où naissent des constructions dont les plans n'ont rien à envier à ceux d'architectes rigoureux et organisés *(voir L'art de la construction chez les insectes sociaux, page 28)*. Dans un autre domaine, celui de l'Univers, l'étude des interactions complexes du trou noir situé au centre de la Voie lactée avec son environnement révèle que ce monstre, ni trop vorace ni trop repu, aurait favorisé l'apparition de conditions propices à la vie sur Terre *(voir Les bienfaits des trous noirs, page 22)*. La vie serait-elle une propriété émergente des systèmes cosmiques complexes ?

Le cerveau est aussi un système complexe, et la conscience en est une propriété émergente. Sans doute en est-il de même pour les pièges de la conscience, les illusions. Et, pour revenir à Richard Feynman, s'il fut un magicien de la complexité, sa contribution à la physique fut loin d'être une illusion.

SOMMAIRE

1 LU ET TO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **Premiers succès pour *Curiosity***

7 **Vers la pilule pour les hommes ?**

9 **Les mémoires ferroélectriques pour bientôt ?**

13 **L'aile optimale du criquet**

... et bien d'autres sujets

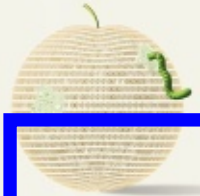
14 ON EN REPARLE

Opinions

16 POINT DE VUE
L'imagerie cérébrale au tribunal ?
Olivier Oullier

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
L'eau comptabilisée à l'échelle européenne
Philippe Crouzet

21 VRAI OU FAUX
Les *Mac* résistent-ils mieux aux virus que les *PC* ?
Jean-Yves Marion



Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* et un encart « Notes de lecture » sur la totalité du tirage ; une édition spéciale comportant un courrier adressé en 4e de couverture est envoyée à 1 000 lycées en France métropolitaine.
En couverture : © Kevin Brown, Mondadori Electa Studios

À LA UNE

22 ASTROPHYSIQUE
Les bienfaits des trous noirs
Caleb Scharf
Le monstre supermassif qui engloutit de la matière au centre de la Voie lactée a peut-être joué un rôle clef dans l'apparition de conditions propices à la vie dans notre région de la Galaxie.

28 ÉTHOLOGIE
L'art de la construction chez les insectes sociaux
Guy Theraulaz, Andrea Perna et Pascale Kuntz
Les termitières et les fourmilières sont des prouesses architecturales. Pourtant, chaque ouvrier bâtisseur n'a qu'une perception locale du nid qu'il construit. Des modèles simples révèlent leurs secrets.

Portfolio 3D
Lunettes en page 8

36 ÉTHOLOGIE
Voyage au centre des termitières et des fourmilières
G. Theraulaz, F. Perrocarougne et Ch. Jost
Grâce à la tomographie à rayon X et à une reconstitution informatique, des chercheurs visitent virtuellement les galeries de ces nids à l'architecture remarquable. Voici les premières images de leur voyage. À vos lunettes 3D !

44 ARCHÉOLOGIE
Les mégalithes de Sumatra
Dominik Bonatz
Les mégalithes des hautes terres de Sumatra, que l'on croyait néolithiques [illegible] des intenses échanges entre les tribus de la forêt et les royaumes bouddhiques du Moyen Âge indonésien.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

52 TECHNOLOGIE
Hélium : la pénurie menace
Christian Gianese
L'hélium, indispensable pour de multiples applications, obéit à des contraintes de production et de distribution complexes. Un contexte aujourd'hui si tendu que ce gaz inerte manque déjà.

60 IMMUNOLOGIE
Système immunitaire contre cancer
Eric von Hofe
Et si notre meilleur allié contre le cancer était... notre propre organisme ? Des traitements visant à apprendre au système immunitaire à reconnaître et à combattre les tumeurs sont en cours de développement.

66 LINGUISTIQUE
Les langues du monde : un même débit d'information
Fr. Pellegrino, Ch. Coupé et E. Marsico
Le débit de parole varie selon les langues, mais plus il est rapide, moins chaque syllabe véhicule d'information. Ainsi, la transmission de l'information est à peu près la même pour toutes les langues.

72 PHYSIQUE THÉORIQUE
Boucles et arbres, à la recherche d'une nouvelle physique
Zvi Bern, Lance Dixon et David Kosower
On calcule les probabilités des processus impliquant les particules élémentaires à l'aide de diagrammes dits de Feynman. Une nouvelle méthode simplifie ces calculs et remet au goût du jour certaines théories unificatrices.

Regards

80 HISTOIRE DES SCIENCES
Les multiples ancêtres du jeu de *Nim*
Lisa Rougetet
Le jeu de *Nim*, un jeu numérique simple, a fourni, au début du XX^e siècle, les bases de la théorie des jeux combinatoires.

86 LOGIQUE & CALCUL
La suite de Stern-Brocot, sœur de Fibonacci
Jean-Paul Delahaye
Si la définition de la suite diatomique de Stern est simple, sa structure est riche de propriétés.

92 SCIENCE & FICTION
Pourquoi tant de grosses têtes dans la science-fiction ?
Jean-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

94 ART & SCIENCE
Les objets impalpables dans l'espace
Daïc Mangin

96 IDÉES DE PHYSIQUE
Les torches à plasma
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

101 SCIENCE & GASTRONOMIE
Conserver les vins au frais
Hervé This

102 À LIRE

Rendez-vous sur
SCIENCE.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- **Toutes les sciences en un clic**
  - Des actualités quotidiennes
  - Des articles en libre accès
  - Votre magazine numérique en ligne
  - Plus de 8 ans d'archives*
- **Des services exclusifs**
  - Les questions aux articles**
  - Des offres d'emploi scientifiques
  - Des newsletters**
  - Un espace abonnement

* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
** En créant votre compte.

BLOC-NOTES

de **Didier Nordon**

FAUX PAS

Le pas qu'a fait Neil Armstrong en juillet 1969, lorsqu'il a posé le pied sur la Lune, fut petit pour lui, mais immense pour l'humanité. Le pas qu'il a franchi en août 2012, lors de son décès, fut immense pour lui, mais petit pour l'humanité : quoi de plus banal, à l'échelle de celle-ci, que de mourir ?

Grâce au pas d'Armstrong sur la Lune, on en sait plus sur la Lune. Malgré son pas dans la mort, on n'en sait pas plus sur la mort.

Le pas le plus immense dont l'humanité puisse rêver serait d'accéder enfin à une connaissance rationnelle sur ce qui advient après la mort. Ce pas-là – on pourra marcher sur la Lune tant qu'on voudra – reste interdit.

RELATIVITÉ PARTICULIÈRE

Les sociologues des sciences les plus radicaux ne vont pas jusqu'à expliquer les différences entre la théorie classique de la gravitation et la théorie relativiste par les différences de personnalités entre Newton et Einstein. Même si tout savoir est marqué par les conceptions du temps et du lieu où il voit le jour, on ne lui attribue le nom de théorie scientifique que s'il a un minimum indiscutable d'indépendance par rapport aux personnes qui l'ont établi.

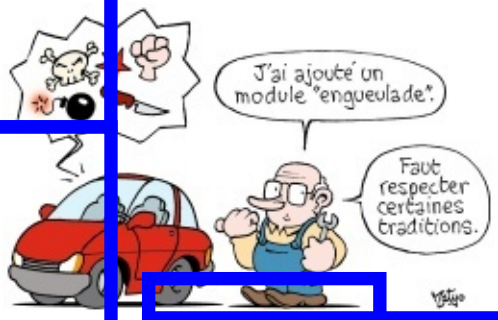
Il est douteux que les théories économiques aient ce minimum d'indépendance. Un libéral et un altermondialiste, par exemple, ne hiérarchisent de la même façon ni les facteurs ni la priorité des maux à traiter. Ce qui est théorie aux yeux de l'un est pure idéologie aux yeux de l'autre. L'expression « théorie économique » signifie (soyons un brin polémique !) : « C'est mon point de vue et je m'y tiens. »

Quant à la famille, c'est un sujet sur lequel aucune réflexion n'est indépendante de son auteur. Un être humain ne peut pas penser la famille en faisant abstraction de ce qui l'a déterminé au plus profond : sa propre famille, avec laquelle (ou contre laquelle) il s'est éveillé au monde. Quand les gens favorables à l'adoption par les couples homosexuels et les tenants de la famille « traditionnelle » se combattent, ce sont des ressentis personnels qui s'opposent, non des théories entre lesquelles des arguments permettent de trancher. Il n'y a pas de théories de la famille discriminant ce qui est souhaitable et ce qui ne l'est pas, mais des constructions individuelles rationalisant des attitudes engendrées par des vécus aux aussi individuels.

DRONE D'HISTOIRE

La technologie nécessaire aux drones était désormais au point, nous allions pouvoir remplacer nos voitures par des drones terrestres. Ces voitures automatisées éviteront mieux que nous les fausses manœuvres, d'où une meilleure sécurité.

Actuellement, la plupart des voitures n'ont qu'une occupant que le conducteur. Devenues drones, elles circuleront vides, puisque le conducteur sera inutile. Il n'y aura donc personne dedans pour s'énerver dans les embouteillages. Nous marcherons tranquillement sur le trottoir en les contemplant de l'extérieur. Et nous tiendrons des propos amusés sur l'absurdité de la situation à laquelle sa passion pour l'automobile conduit notre civilisation…



MOT DERNIER

Deux termes désignent le lien plus ou moins passionnel qu'un homme entretient avec son pays : patriotisme et nationalisme. Mais il n'y en a aucun pour désigner le lien qu'il entretient avec son époque. Pourtant, un homme est attaché à celle autant qu'à son pays. Détester tout de son époque ferait de lui un inadapté, de même que détester tout de son pays. Forger des analogues temporels aux mots patriotisme et nationalisme s'impose donc.

Le terme « tempisme », pour désigner le fait d'aimer son temps, serait confondu avec « tantpisme » : rejetons-le. Écartons aussi « époquisme », qui serait parasité par la connotation « vieillerie ». Je suggère « chronisme ». Ce mot n'existe pas non plus, mais il apparaît dans beaucoup de composés (anachronisme, synchronisme, etc.), manifestant ainsi un évident désir de naître. Il s'impose donc pour dénommer une notion qui, tout comme lui, n'existe pas, mais le demande qu'à naître. Quant à l'amour exclusif excessif d'un homme pour son époque, je propose « hyperchronisme ». L'hyperchronisme est au chronisme ce que le nationalisme est au patriotisme.

Peut-être objectera-t-on que, le patriotisme et le nationalisme ayant contribué à trop de malheurs, il n'est pas avisé de leur adjoindre des équivalents temporels.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Reproche infondé : on ne peut pas, au nom de l'hyperchronisme, déclarer la guerre à quelque époque révolue et y commettre des atrocités. Du moins, tant que la machine à remonter le temps n'est pas au point.

PRISE DE *E*-POUVOIR

On peut regarder dix fois, cent fois, un même article d'un dictionnaire papier. Celui-ci, avec une patience d'ange, répète dix fois, cent fois, le renseignement qu'il a déjà fourni. Cette pédagogie est la plus mauvaise qui soit. On n'est pas incité à retenir ce qu'on lit, si on est certain de le retrouver dans le dictionnaire dès qu'on veut.

Le salut viendra des dictionnaires électroniques. Programmons-les pour que, au bout de trois consultations d'un article, celui-ci s'efface à jamais. L'utilisateur peut donc consulter l'article, l'oublier, le consulter une deuxième fois, l'oublier encore. À la troisième reprise, le dictionnaire avertit : « Vous consultez cet article pour la dernière fois. Faites enfin l'effort de mémoriser ce que vous lisez. » Il ajoute une tirade de longueur et de sévérité proportionnelles au nombre d'articles qu'il a déjà effacés : « Je n'ai jamais vu un utilisateur aussi nul que vous. » Pour s'éviter l'humiliation d'une telle remontrance, l'utilisateur aiguisonnera sa mémoire, laquelle, à force d'être ainsi stimulée, deviendra peut-être – qui sait ? – aussi puissante que celle dont ont joui nos ancêtres avant l'expansion de l'écriture. ■

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Dictionnaire des sculpteurs neo-baroques français (1870-1914)
Guillaume Peigné
560 pages
12 x 18 cm
ill. n. et b.
16 €

Guide des sources de l'histoire de l'art aux Archives nationales et aux Archives de Paris
Sous la direction de Martine Plouvier
784 pages
17 x 22 cm
ill. couleur et n. et b.
35 €

On est tous dans le brouillard
Essai d'ethnologie urbaine
Colette Pétonnet
Réédition établie par Catherine Choron-Baix
544 pages
12 x 18 cm
ill. n. et b.
16 €

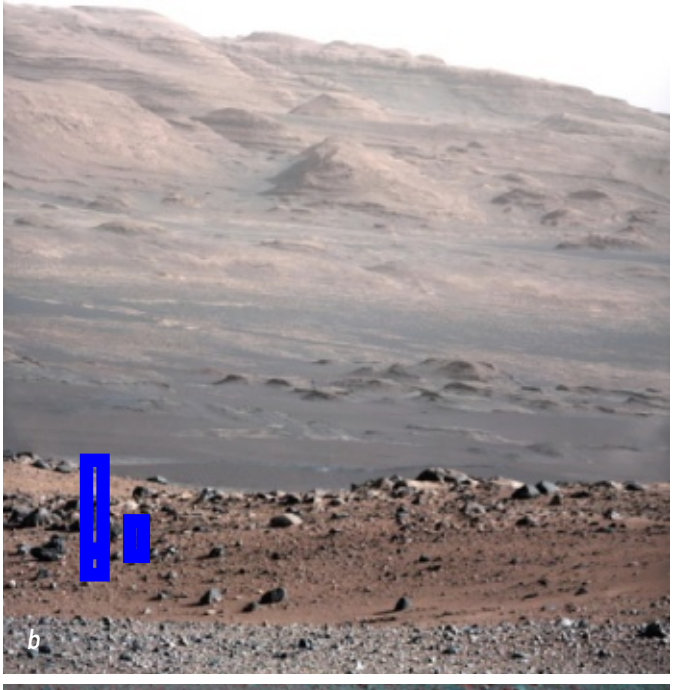
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution S

Planétologie

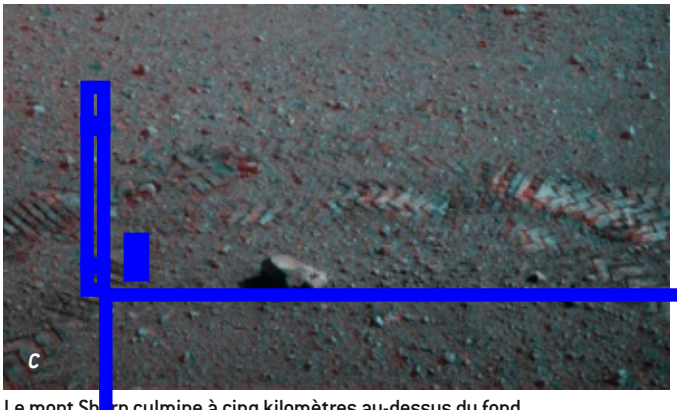
Premiers succès pour *Curiosity*

Le rover de la NASA a testé son laser et a parcouru ses premiers mètres sur le sol martien.

© NASA/JPL-Caltech/Ken Kremer/Marco Di Lorenzo



© NASA/JPL-Caltech



© NASA/JPL-Caltech/ Stuart Atkinson

Le mont Sharp culmine à cinq kilomètres au-dessus du fond du cratère Gale, où s'est posé *Curiosity (b)*. Les strates rocheuses à la base du mont Sharp sont très similaires à celles visibles dans le Grand Canyon sur Terre *(b)*. *Curiosity* a fait ses premiers « pas » sur la planète rouge *(c, en 3D avec les lunettes anaglyphes à détacher page 28)*.

Depuis son atterrissage périlleux sur la planète rouge le 6 août dernier, le robot *Curiosity* de la NASA a commencé à tester ses différents instruments et systèmes de navigation, envoyant ses premières images du cratère Gale où il s'est posé.

Le rover, le plus gros engin jamais posé sur Mars, est équipé de 12 instruments scientifiques (dont deux réalisés par des équipes françaises) : des spectromètres, des caméras, des minilaboratoires d'analyse. L'objectif de la mission *Mars Science Laboratory* est d'examiner l'environnement du cratère Gale à la recherche d'indices liés à la présence passée ou présente d'environnements propices à la vie.

Dans cet ancien cratère d'impact de 150 kilomètres de diamètre, l'érosion éolienne et des impacts récents ont exhumé des matériaux autrefois enterrés, tels d'anciens dépôts fluviaux et des terrains fracturés riches en minéraux.

Le cratère est dominé par un pic central, le mont Sharp, qui culmine à plus de 5000 mètres au dessus des plaines environnantes *(cliché a)*. Il est constitué de strates de roches sédimentaires qui, lues de haut en bas, fourniront une chronologie de la jeunesse de la planète. Elles pourraient notamment livrer des signatures éventuelles de vie passée.

D'ici quelques mois, *Curiosity* entamera l'ascension du mont Sharp. Pour l'heure, le robot a seulement effectué ses premiers pas, en testant virage et marche arrière *(cliché c)*. Il a ensuite parcouru une vingtaine de mètres vers sa première destination, un site nommé Glenelg.

L'instrument franco-américain *ChemCam*, un laser couplé à des spectromètres, a également passé les tests avec succès. Le laser a d'abord été pointé sur une petite pierre surnommée Couronnement. Trente impulsions de cinq nanosecondes et d'un mégawatt de puissance ont porté la surface de la roche à 10 000 °C, vaporisant une petite partie de sa surface en un plasma dont le spectre lumineux a été analysé.

Une seconde roche a subi le même sort quelques jours plus tard. Selon Sylvestre Maurice, responsable de l'instrument *ChemCam* à l'IRAP, à Toulouse, « les données sont encore plus précises que celles récoltées sur Terre ». En analysant les roches jusqu'à neuf mètres de distance, *ChemCam* permettra de sélectionner les plus intéressantes et d'étudier celles inaccessibles au robot.

Il reste cependant plusieurs points critiques à tester avant que le robot ne s'aventure loin du site d'atterrissage, nommé Bradbury Landing par la NASA en hommage au célèbre auteur des *Chroniques martiennes* décédé en juin dernier. Il s'agira notamment de tester le bras articulé pour récupérer des échantillons, un point clef de la mission scientifique.

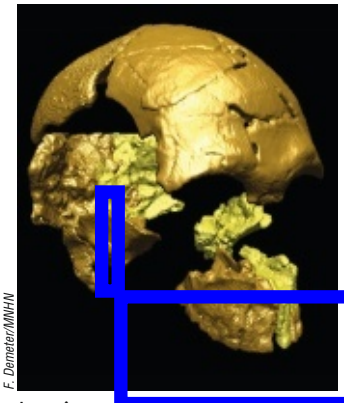
➜ Philippe Ribeau-Gésippe

Mission Mars Science Laboratory : www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Paléontologie humaine

Le plus ancien Asiatique moderne



F. Demeter/MNHN

Le crâne partiellement reconstruit à partir des restes mis au jour au Nord du Laos [illegible] l'homme moderne vi[illegible]

La dispersion des hommes anatomiquement modernes en Eurasie et en Australasie n'a commencé qu'il y a 80 000 ans et a duré environ 50 000 ans. Si les dates jalonnant cette conquête sont étayées pour l'Europe, elles prêtent à discussion pour l'Asie. Mais la situation s'améliore depuis que Fabrice Demeter, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et son équipe ont mis au jour un fossile d'humain moderne au fond de la grotte de Tam Pa Ling, au Nord du Laos. La radiodatation directe, par le rapport isotopique uranium/thorium, de ces restes – un frontal complet, un fragment d'os occipital, un fragment d'os temporal et un maxillaire – indique un âge minimum de 63 000 ans. Selon F. Demeter, le crâne de l'homme de Tam Pa Ling présente une morphologie moderne dans ses caractères frontaux, occipitaux et maxillaires, et diffère de ceux des Néandertaliens de l'Ouest de l'Asie. Le fossile de Tam Pa Ling est donc le témoin d'une population d'hommes modernes, qui a investi le Sud de l'Asie il y a quelque 60 000 ans.

➜ François Savatier

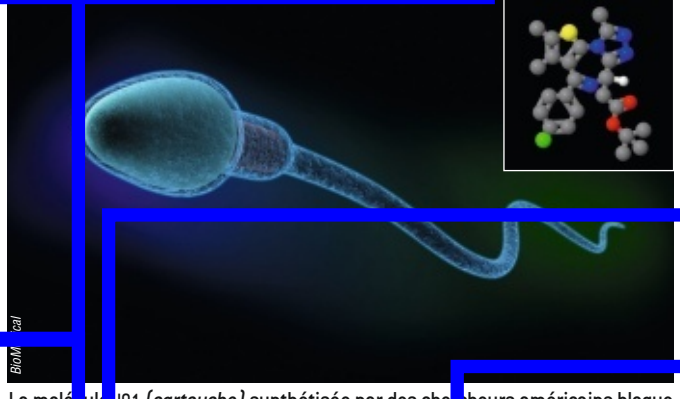
F. Demeter et al., PNAS, en ligne le 20 août 2012

Physiologie

Vers la pilule pour les hommes ?

Depuis la mise au point de la pilule (hormonale) pour les femmes, aucune approche nouvelle de la contraception n'a été proposée. Son équivalent pour les hommes n'existe pas, alors que dans les pays développés, près d'un homme sur deux se dit prêt à prendre une pilule contraceptive, si elle était disponible. Un pas vient cependant d'être franchi vers une pilule masculine et non hormonale par l'équipe de [illegible] de la Faculté de médecine Bayer à Houston aux États-Unis, et celle de James Bradner, à Boston.

Dans leurs travaux, qui portent sur la souris, ces chercheurs ont synthétisé une petite molécule, JQ1, capable de se fixer sur la protéine BRDT, une molécule essentielle au développement des spermatozoïdes, et de bloquer ainsi son action. La molécule JQ1 se révèle capable de stériliser les souris mâles, de façon réversible et sans effets indésirables. L'injection quotidienne de JQ1, pendant six semaines, à des souris mâles initialement âgées de six semaines a ainsi divisé par 9 le nombre de leurs spermatozoïdes et par 17 (de 85 à 5 pour cent) la proportion de spermatozoïdes mobiles. Pendant la durée du traitement, les niveaux d'hormones des souris n'ont pas changé et leur comportement sexuel n'a pas été altéré. Enfin, quatre mois après l'arrêt des injections de JQ1, la fertilité des mâles est revenue à la normale.



BioMedical

La molécule JQ1 *(cartouche)* synthétisée par des chercheurs américains bloque chez la souris l'action de la protéine BRDT, essentielle à certaines étapes de la maturation des spermatozoïdes.

La protéine BRDT étant aussi présente chez l'homme, la molécule JQ1 pourrait être testée chez ce dernier. Et d'autres molécules inhibant le développement ou la mobilité des spermatozoïdes sont à l'étude. En attendant, selon Jean-Claude Soufir, de l'Hôpital Cochin à Paris, la contraception masculine sera d'abord hormonale : plus sûre que la testostérone déjà [illegible] essais cliniques avancés, ce qui est loin d'être le cas des molécules non hormonales.

➜ Maéva Vignes

M. M. Matzuk et al., Cell, vol. 150, pp. 673-684, 2012

En bref

PUNAISES HÉLIONETTOYÉES

Au soleil, les punaises *Boisea rubrolineata* dégagent une forte odeur qui provient de molécules à la surface de leur cuticule, des monoterpènes. La biosynthèse de ces composants est activée par la lumière. Gerhard Gries, de l'Université Simon Fraser, au Canada, a montré que ces molécules agissaient comme un fongicide, en particulier contre le champignon pathogène *Beauveria bassiana*, en empêchant la germination des spores et leur croissance.

LES PIEDS DANS LE TAPIS

Pour amortir la chute, rien de mieux qu'un tapis... mais pas n'importe lequel : celui conçu à l'Université de Manchester par l'équipe de Patricia Scully est parcouru de fibres optiques qui enregistrent les signaux laissés par les pas d'une personne. Un ordinateur peut analyser cette démarche, détecter une chute et déclencher un appel d'aide. Ce tapis a aussi un rôle préventif, il peut déceler des altérations de la démarche d'une personne âgée qui indiquent une détérioration [illegible]

POURQUOI NEUF MOIS ?

Après neuf mois de gestation, les bébés humains ont des capacités motrices et cognitives limitées. Pourquoi la gestation n'est-elle pas plus longue ? La taille du bassin est souvent invoquée : le fœtus serait plus gros, nécessitant un bassin plus large de la mère, ce qui compromettrait la bipédie. L'anthropologue américaine Holly Dunsworth avance une autre théorie : le métabolisme de la mère ne suffirait pas pour nourrir correctement un fœtus au-delà de neuf mois.

En bref

LA MISE DU SOLEIL

D'où vient l'aluminium 26 présent dans les météorites les plus anciennes du Système solaire ? On a longtemps pensé à une supernova qui aurait explosé près du Soleil lors de sa formation. S'appuyant sur l'observation de la formation d'étoiles jeunes, Matthieu Gounelle, du Muséum à Paris, et Georges Meynet, de l'Observatoire de Genève, ont proposé un scénario moins exceptionnel : une étoile géante aurait accumulé dans son voisinage de grandes quantités d'hydrogène, qui auraient fait naître d'autres étoiles dont le Soleil, et l'aluminium 26 aurait été apporté par son vent stellaire.

TIGRES EN ÉQUIPE DE NUIT

Les quelque 1 220 tigres qui vivent dans le Parc national de Chitwan, au Népal, ont acquis des habitudes nocturnes pour mieux éviter les humains, tout en empruntant les mêmes pistes qu'eux. C'est ce qu'ont constaté Jianguo Liu, de l'Université de l'État du Michigan, et ses collègues américains et népalais. Ainsi, la préservation des tigres ne nécessiterait pas forcément de grands territoires vierges de présence humaine.

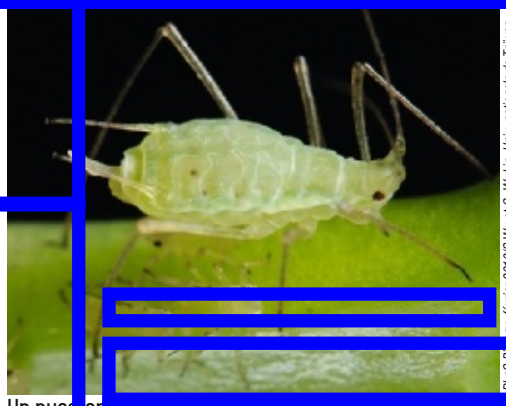
Entomologie

Photosynthèse archaïque chez les pucerons

Pourquoi les pucerons verts du pois (*Acyrthosiphon pisum*) produisent-ils en abondance des caroténoïdes – des molécules dérivées du carotène, le pigment qui donne leur couleur aux carottes ? Parce qu'ils l'utilisent comme source d'énergie dans un processus proche de la… photosynthèse. Jean-Christophe Valmalette, à l'Université Sud Toulon-Var, et ses collègues font part de cette conclusion en mesurant chez ces insectes la production d'ATP, la molécule qui, chez tous les organismes vivants, fournit l'énergie chimique nécessaire au métabolisme.

Si nombre d'organismes utilisent les caroténoïdes dans leur métabolisme, seuls les plantes, les algues et les champignons en produisent, et les animaux s'en procurent par leur alimentation. C'est du moins ce que l'on pensait jusqu'à ce que l'étude du génome des pucerons, en 2010, montre qu'ils en synthétisent aussi – et en quantité. Intrigués, les entomologistes ont testé différentes fonctions physiologiques chez l'insecte. Ils se sont aperçus avec surprise qu'en présence de lumière, les pucerons produisaient beaucoup plus d'ATP que dans l'obscurité, et que cette production était d'autant plus importante qu'ils synthétisaient plus de caroténoïdes.

Le mécanisme en jeu serait un ancêtre de la photosynthèse : en activant les caroténoïdes, la lumière déclencherait la production d'électrons libres qui seraient transférés à la machinerie de production de l'ATP, dans les mitochondries. Par ce mécanisme, les pucerons engrangeraient de l'énergie pour les périodes de disette ou de surpopulation.



PLoS Biology, février 2010/S. Wu et G.-W. Lin, Univ. nationale de Taïwan

Un puceron du pois se nourrissant de sève.

Et pourquoi les pucerons verts du pois ne sont-ils pas orange, comme les carottes ? Certains le sont ! Les caroténoïdes sont des pigments de diverses couleurs. Dominante sous les conditions optimales (22 °C, ressources abondantes, population peu dense), la pigmentation verte passe à une teinte rose à basse température (8 °C). Les pucerons deviennent blancs lorsque les [illegible] et que la population se densifie.

→ Marie-Neige Cordonnier

J.-Ch. Valmalette et al., Scientific Reports, vol. 2, n° 579, 2012

Archéologie

Un bateau romain à Antibes

En 49 avant notre ère, César prend Massalia (Marseille) et lui enlève ses colonies, dont Antipolis (Antibes) qui, très vite, devient une cité portuaire romaine très active. Fouillée avant la construction d'un parking souterrain, une partie du fond du port antique d'Antibes a livré une épave très bien conservée – un long fragment de la carène d'un gros bateau marchand romain.

Long d'une vingtaine de mètres, le navire mis au jour a [illegible] au IIe ou au IIIe siècle. Seul l'un de ses flancs a été conservé par les conditions humides et anaérobies régnant sous la vase du port. Sur 14 mètres, la quille et les membrures ainsi qu'un bordé intérieur ont été bien préservés ; en revanche, [illegible] du mât – qui devait être encastré sur deux blocs posés sur les membrures – est absent.

Gianlia Boetto, spécialiste de l'architecture navale antique du [illegible], qui suit cette partie des fouilles menées par l'INRAP, a tout de suite [illegible] construction gréco-romaine, typique des bateaux antiques de l'espace méditerranéen.

Les virures, c'est-à-dire les planches qui constituent le bordé, sont jointes bord à bord et liées les unes aux autres par des mil-liers de languettes de bois dur, généralement en chêne. Ces languettes sont introduites dans des [illegible] (fentes) taillées au ciseau dans la tranche de chaque virure, puis bloquées par des chevilles. Ainsi, les membrures constituant le squelette du bateau ne jouent qu'un rôle secondaire dans cette architecture où le bordé est la structure principale. Cette « construction sur bordé », qui commence par la « peau » pour finir par le squelette du bateau, se déroule dans l'ordre inverse de la « construction sur squelette », qui caractérise l'architecture navale en bois actuelle.

Rémi Benali/INRAP

L'intérieur de la carène du bateau romain d'Antibes est dans un très bon état de conservation, dû aux conditions anaérobies régnant sous la vase du port.

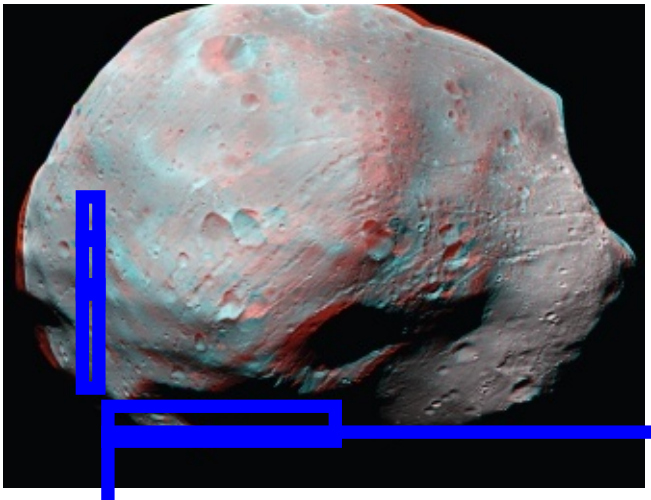
© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Planétologie

Phobos en relief

Le 18 août 1877, l'astronome américain Asaph Hall découvrait Phobos et Deimos, les deux satellites naturels de Mars. À l'occasion de ce 135e anniversaire, l'Agence spatiale européenne publie cette vue en 3D *(avec lunettes anaglyphes)* de Phobos, acquise par la sonde *Mars Express*. L'origine de cette lune de 27 kilomètres de longueur n'est pas encore claire. Son spectre suggère une composition semblable à celle des météorites de type C, provenant des marges de la ceinture d'astéroïdes. Mais les derniers survols par la sonde *Mars Express* ont permis de préciser sa densité : avec 1,85 gramme par centimètre cube, Phobos ressemble plutôt aux astéroïdes de classe D, des agrégats de roches liés par la gravité. La petite lune serait ainsi un astéroïde capturé par Mars. Cependant, elle décrit une orbite très circulaire et dans le plan équatorial de Mars, alors que des lunes capturées [illegible] orbites excentriques et inclinées. Une exploration *in situ* permettrait de trancher ; hélas, toutes les missions vers Phobos se sont soldées par un échec, le dernier en date étant celui de *Phobos-Grunt*, en 2011.

→ Ph. R.-G.



© ESA /DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Biologie animale

Les cris des gibbons

Les humains ne sont pas les seuls à avoir une voix qui monte vers les aigus lorsqu'ils respirent de l'hélium. Hiroki Koda, de l'Université de Kyoto, et ses collègues ont analysé le cri des gibbons sous hélium et sous une atmosphère normale. Comme chez l'homme, l'inhalation d'hélium modifie les résonances dans le système vocal, la vitesse du son étant changée. L'énergie acoustique se distribue dans les hautes fréquences, d'où une voix plus aiguë. Mais le son reste formé des mêmes fréquences (une fondamentale et des harmoniques), ce qui confirme que la source (les cordes vocales) est indépendante du filtre (le conduit vocal). En l'absence d'hélium, les singes concentrent l'énergie acoustique sur la fréquence fondamentale, à l'instar des chanteuses soprano. Le son résultant porte loin, un atout dans les forêts denses où vivent les gibbons.

→ Guillaume Jacquemont

H. Koda et al., American Journal of Physical Anthropology, en ligne le 24 août 2012

Physico-chimie

Des mémoires ferroélectriques pour bientôt ?

Un matériau ferroélectrique contrôlé à température ambiante pourrait offrir une alternative plus performante aux matériaux magnétiques utilisés dans les disques durs. Or une nouvelle famille de matériaux ferroélectriques [illegible] par Alon Tayi et Alexander Shveyd, de l'Université Northwestern, aux États-Unis, et leurs collègues.

Actuellement, dans un disque dur, chaque bit d'information est codé en appliquant un champ magnétique à un composé ferromagnétique, c'est-à-dire qui s'aimante en présence d'un champ magnétique. Le champ orientant l'aimantation selon deux directions privilégiées, qui correspondent aux deux valeurs (0 ou 1) du bit.

L'application d'un champ magnétique exigeant de l'énergie, les physico-chimistes tentent de remplacer les composés magnétiques par des matériaux ferroélectriques qui, contrôlés *via* un champ électrique, devraient être moins énergivores. Constitués de molécules formant des dipôles électriques parallèles, ces matériaux ont une polarisation électrique stable qu'un champ électrique peut inverser : ses deux orientations pourraient coder un bit.

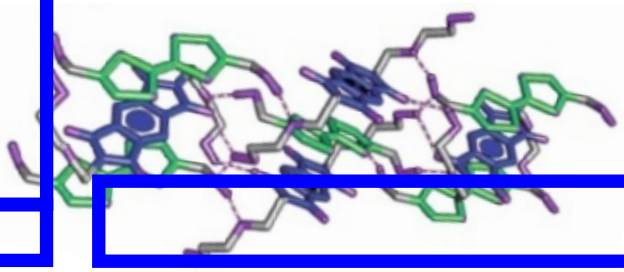
Mais jusqu'à présent, de tels matériaux ferroélectriques ne fonctionnaient qu'à très basse température. Les matériaux de la nouvelle famille sont en revanche contrôlables à température ambiante. Deux types de molécules sont en jeu : une molécule « donneuse » (dérivée du naphtalène, de pyrène ou de tétrathiafulvalène) transfère des électrons à une molécule « acceptrice » (diimide pyromellitique). En contrôlant la façon dont les molécules s'emboîtent, les physico-chimistes ont créé des structures supramoléculaires où tous les dipôles ont la même orientation et dont la polarisation s'inverse dans un champ électrique.

Réalisés à partir de composants simples et peu coûteux, les dipôles s'organisent en longues chaînes que l'on fait croître à l'envi sur divers supports. Des applications sont envisagées dans divers domaines, tels que les capteurs ou la photonique. Ces matériaux ayant aussi de bonnes propriétés magnétiques, ils laissent espérer des matériaux à la fois ferroélectriques et ferromagnétiques, qui stockeraient quatre fois plus d'informations si ces propriétés étaient contrôlées indépendamment.

Mais le Graal de ces matériaux est peut-être encore ailleurs, explique Éric Collet, de l'Institut de physique de Rennes : le délai d'établissement du champ limite le contrôle des matériaux à un ou deux milliards d'opérations par seconde. En [illegible] matériau ferroélectrique pour le contrôler par [illegible], on réalise 1 000 fois plus d'opérations.

→ M.-N. C.

A. Tayi et al., Nature, vol. 488, pp. 485-489, 2012



A. Tayi et al., Nature, 2012

La structure cristalline d'un des matériaux ferroélectriques réalisés, constitué d'un accepteur d'électrons à base de diimide pyromellitique *(en bleu)* et d'un donneur d'électrons dérivé du tétrathiafulvalène *(en vert)*.

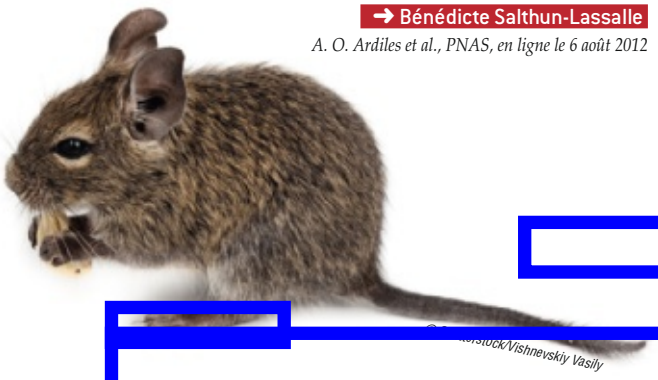
Neurobiologie

Alzheimer : un modèle naturel

Adrian Palacios, à l'Université de Valparaíso au Chili, et ses collègues chiliens, américains et français ont montré qu'un petit rongeur, le dégu du Chili (*Octodon degus*), pourrait bien aider la recherche : quatre animaux sur cinq développent naturellement – avec l'âge et sans aucune modification génétique – une maladie d'Alzheimer et constitueraient donc de bons modèles d'étude de cette pathologie. Avec l'âge (entre 36 et 60 mois), des plaques séniles et des dégénérescences neurofibrillaires s'accumulent dans le cerveau du rongeur, selon des schémas temporel et spatial identiques à ceux de l'homme. Et le déclin des capacités cognitives des dégus, en particulier une diminution de leur mémoire spatiale et de leur aptitude à reconnaître des objets, est lié au développement des lésions et à leur propagation. Les scientifiques ont également confirmé le dysfonctionnement des synapses et de leur plasticité, ainsi que la diminution de la quantité de protéines [illegible] la dégénérescence des neurones. Ils concluent que le dégu du Chili représente un modèle idéal pour l'étude des étapes précoces de la maladie d'Alzheimer sporadique et le développement de thérapies.

➜ Bénédicte Salthun-Lassalle

A. O. Ardiles et al., PNAS, en ligne le 6 août 2012



Shutterstock/Vishnevskiy Vasily

Linguistique

Le berceau indo-européen

Les langues indo-européennes forment une vaste famille, incluant notamment les langues celtiques, germaniques, latines et indo-iraniennes. Selon Remco Bouckaert, de l'Université d'Auckland en Nouvelle-Zélande, et ses collègues, elles seraient originaires d'Anatolie, dans l'actuelle Turquie, et non du Nord de la mer caspienne, en Russie, comme le stipulait une hypothèse concurrente.

Les chercheurs ont analysé 103 langues indo-européennes en adaptant des méthodes dites phylogéographiques, utilisées pour étudier l'origine et la progression des épidémies virales. Ces méthodes déterminent les relations de parenté entre les ADN viraux de différentes régions – ici, entre des mots traduits dans les différentes langues – et intègrent des critères géographiques sur les voies possibles de dissémination. Les chercheurs ont ainsi reconstitué l'expansion des langues indo-européennes. Les [illegible] avec l'expansion de l'agriculture, de sorte que les deux phénomènes sont probablement liés. Les langues indo-européennes auraient pour origine géographique l'Anatolie, il y a 9500 à 8000 ans.

➜ G. J.

R. Bouckaert et al., Science, vol. 337, pp. 957-960, 2012

Cosmologie

L'Univers n'est pas fractal à grande échelle

Le modèle du Big Bang, qui décrit l'évolution de l'Univers depuis une fraction de seconde après sa naissance jusqu'à aujourd'hui, repose sur deux hypothèses fondamentales : l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle. Le premier critère indique que les propriétés de l'Univers sont les mêmes d'un endroit de l'espace à un autre, tandis que le second stipule qu'elles sont identiques dans toutes les directions. Morag Scrimgeour, du Centre international de recherche en radio-astronomie en Australie, et ses collègues ont utilisé le catalogue de galaxies observées par l'expérience *WiggleZ* pour vérifier l'homogénéité de l'Univers aux grandes échelles.

L'homogénéité n'est en effet pas vérifiée à toutes les échelles. Nous observons des structures évidentes : galaxies, amas de galaxies ou superamas de galaxies. Cette organisation persiste-t-elle à toutes les échelles, comme dans les objets fractals, ou une transition s'opère-t-elle à très grande échelle vers un Univers qui semble homogène ? Dans ce dernier cas, les structures apparentes à petite échelle seraient lissées aux échelles plus grandes, de la même façon que les pixels d'une image sont visibles individuellement [illegible] mais recouvrent une impression d'ensemble homogène quand on prend du recul.

M. Scrimgeour et ses collègues ont sélectionné 180 000 galaxies du catalogue établi par l'expérience *WiggleZ*, conduite avec un télescope anglo-australien. Ils ont étudié l'homogénéité de l'Univers tel qu'il est aujourd'hui et tel qu'il était à différentes époques passées. La méthode consiste à compter le nombre de galaxies dans une sphère de volume donné (centrée sur une galaxie) et à déterminer à partir de quel rayon ce nombre est proportionnel au volume de la sphère (au cube du rayon, ou à une puissance non entière pour une théorie plus générale reposant sur un modèle fractal). Ils ont aussi utilisé une simulation à *N* corps modélisant l'évolution de l'Univers et la formation des grandes structures pour valider leur méthode. Ces deux approches ont livré des résultats équivalents : ils sont compatibles avec un Univers homogène aux échelles [illegible] 1400 millions d'années-lumière, ce qui conforte l'une des hypothèses clés de la théorie du Big Bang.

➜ Sean Bailly

M. I. Scrimgeour et al., MNRAS, vol. 425(1), pp. 116-134, 2012

NASA, N. Pirzkal (STScI/ESA) et l'équipe HUDF (STScI)

Des centaines de galaxies, observées ici par *Hubble*, forment des amas et des superamas, mais jusqu'à quelle échelle existent-ils ?

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Nanotechnologies

Des nanoparticules d'or sculptées par l'ADN

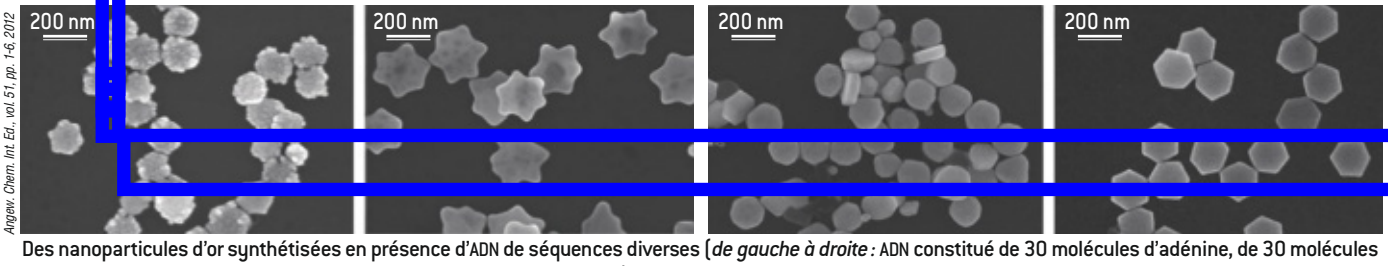
Zidong Wang et ses collègues, de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign et de l'Université de Pékin, ont montré que de l'ADN peut contrôler la morphologie de nanoparticules d'or. Dans une solution aqueuse, ils ont introduit des nanocristaux d'or et de courts brins d'ADN de taille fixée, mais de séquence variée. Selon leur composition, ces brins d'ADN se lient préférentiellement sur certaines surfaces des nanocristaux. Quand, en présence de sels d'or, on fait croître les cristaux jusqu'à former des nanoparticules, ces dernières présentent des formes et des rugosités variables suivant la séquence d'ADN introduite.

Par exemple, si toutes les bases (parmi l'adénine, la cytosine, la guanine et la thymine) de la molécule d'ADN sont de la guanine, les nanoparticules d'or sont hexagonales, plates et lisses ; si toutes les bases sont de l'adénine, elles sont circulaires, plates et rugueuses. Avec deux types de bases, trois scénarios sont possibles : une compétition, où la base majoritaire détermine la forme des nanoparticules ; une synergie, qui fait apparaître des formes inédites ; ou bien la dominance d'une base qui régit la forme des nanoparticules même si elle est minoritaire.

Les mécanismes sous-jacents ne sont pas bien élucidés, mais de telles nanoparticules pourraient avoir des applications en biologie. L'ADN utilisé conservant sa capacité à s'hybrider avec des séquences d'ADN complémentaires, les nanoparticules d'or pourraient notamment servir à détecter la présence des séquences d'ADN particulières.

➜ M. V.

Z. Wang et al., Angew. Chem. Int. Ed., vol. 51, pp. 1-6, 2012



Angew. Chem. Int. Ed., vol. 51, pp. 1-6, 2012

Des nanoparticules d'or synthétisées en présence d'ADN de séquences diverses (*de gauche à droite :* ADN constitué de 30 molécules d'adénine, de 30 molécules de thymine, de 30 molécules de cytosine, de 20 molécules de guanine).

Paléontologie

L'os interpariétal retrouvé

On croyait l'os interpariétal, l'un des os du toit crânien, disparu chez plusieurs lignées de mammifères. Marcelo Sánchez, de l'[illegible] de Zurich, et deux collègues ont montré que ce n'est pas le cas : en fait, cet os a seulement fusionné avec des os voisins, les pariétaux.

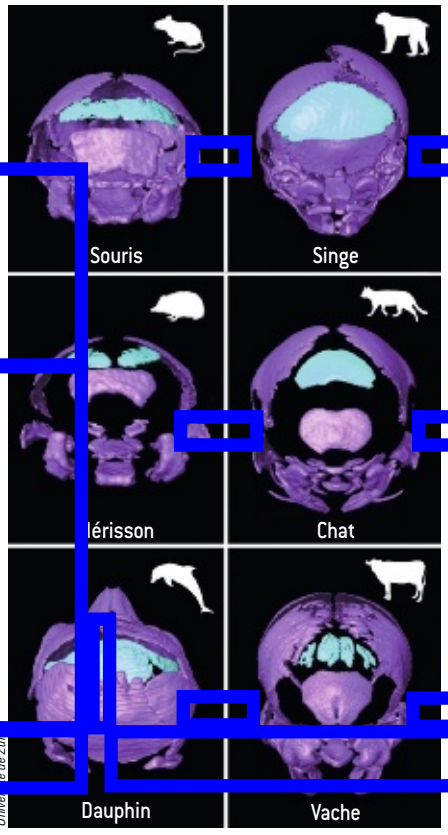
L'os interpariétal est placé entre les pariétaux (les os latéraux de la voûte crânienne), mais aussi entre les frontaux et l'occiput supérieur. Il est présent non seulement chez les humains, mais aussi chez les ongulés (cheval, âne, etc.) et les mammifères carnivores (chat) *(voir la figure)*. Mais il paraissait absent chez les cochons, les monotrèmes, les tatous, certains marsupiaux… Cela intriguait d'autant plus que l'étude de la structure de l'os interpariétal de mammifères a révélé qu'il est composé de plusieurs [illegible] dont les histoires évolutives sont différentes.

Par une forme non invasive de microtomographie, l'équipe de M. Sánchez a réussi à reconnaître l'os interpariétal chez quelque 250 espèces de toutes les lignées de mammifères. Cependant, ces chercheurs ont constaté qu'il est [illegible] absentable qu'au stade embryonnaire. C'est sans doute pourquoi les anatomistes n'ont pu l'identifier chez les animaux de certaines lignées.

M. Sánchez et ses collègues ont aussi découvert que l'os interpariétal résulte de la fusion de quatre éléments : une paire médiane et une paire latérale d'os interpariétaux. Ces os interpariétaux latéraux apparaissent donc comme une lointaine évolution des os tabulaires des reptiles mammaliens préhistoriques, qui dérivent du mésoderme (un feuillet cellulaire intermédiaire de l'embryon, entre l'ectoderme [illegible]), ce qui n'est pas le cas des os de la paire médiane. Cela explique les origines évolutives différentes des tissus osseux de l'os interpariétal.

→ F. S.

D. Koyabu et al., PNAS, en ligne le 13 août 2012



L'os interpariétal *(en bleu)* chez quelques espèces de mammifères.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Neurosciences

Apprendre en dormant

Des associations entre des sons et des odeurs peuvent être apprises en dormant, ont montré Anat Arzi, de l'Institut Weizmann en Israël, et ses collègues. L'étude a consisté à soumettre des participants à des odeurs plaisantes ou déplaisantes durant leur sommeil, simultanément à des sons de diverses tonalités. Une odeur agréable entraîne chez les dormeurs une inhalation plus profonde qu'une odeur déplaisante. Quand on leur faisait entendre ensuite des sons seuls, les participants respiraient plus profondément s'ils entendaient les sons auparavant associés à des odeurs agréables. Cette réaction était observée tant pendant le sommeil qu'après le réveil : les dormeurs ont inconsciemment appris les relations entre sons et odeurs imposées par les scientifiques durant le sommeil. L'expérience d'A. Arzi montre ainsi que le cerveau est capable, durant cette phase inconsciente, d'acquérir de nouvelles informations.

→ Maurice Mashaal

A. Arzi et al., Nature Neuroscience, en ligne le 26 août 2012

Astrophysique

Des étoiles qui fusionnent

En 2010, les astronomes avaient découvert dans l'amas stellaire R136, au sein du Grand Nuage de Magellan (une galaxie voisine de la nôtre), quatre étoiles plus massives que toutes celles connues. La plus grosse atteint 265 masses solaires, bien plus que la limite de 150 masses solaires autorisée par les mécanismes de formation classiques. L'un des scénarios possibles est celui de coalescence : ces étoiles résulteraient de la fusion de deux astres plus petits. Sambaran Banerjee, de l'Université de Bonn, et ses collègues ont apporté un argument en sa faveur. Ils ont reconstitué le comportement de l'amas R136 en simulant sur ordinateur l'évolution et les interactions de plus de 170 000 étoiles. Ils ont montré que de nombreuses étoiles se rencontrent et fusionnent, et que si des astres massifs similaires à celles observées aujourd'hui étaient formés en même temps que les autres étoiles, ils auraient aujourd'hui perdu une grande partie de leur masse, et l'émission de vents stellaires. Ces résultats accréditent le scénario de coalescence, mais sont à confirmer.

→ G. J.

S. Banerjee et al., à paraître, 2012

Biophysique

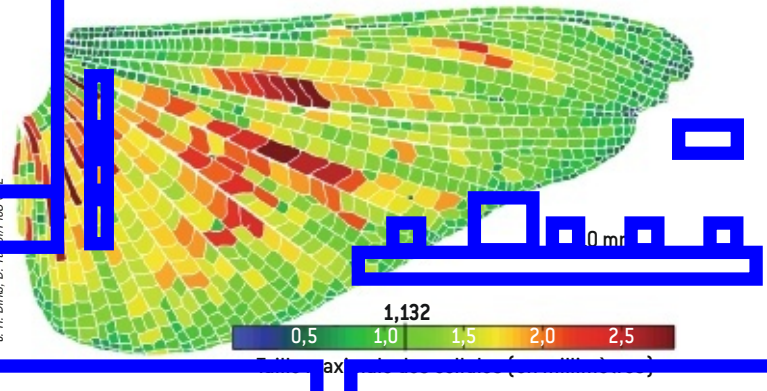
L'aile optimale du criquet

Les criquets pèlerins, *Schistocerca gregaria*, migrent sur plusieurs milliers de kilomètres. Leurs ailes postérieures sont soumises à rude épreuve et peuvent être endommagées par l'usure ou les collisions. Elles sont constituées d'une membrane souple et peu résistante, de 1,7 à 3,7 micromètres d'épaisseur, et d'un réseau de nervures qui renforcent l'aile. Jan-Henning Dirks et David Taylor, du Centre de bio-ingénierie du *Trinity College*, en Irlande, ont montré que la distribution des nervures est optimisée pour empêcher la propagation de fissures qui se créent dans la membrane, tout en limitant le poids des ailes. Les nervures transverses renforcent la résistance de l'aile aux déchirements. Elles limitent aussi la propagation d'une fissure de la membrane, qui pourrait apparaître sous l'action d'une tension exercée sur l'aile. Plus l'aile présente de nervures transverses, plus elle est résistante, mais elle est aussi réduite dans sa flexibilité de l'aile et augmente son poids. Quel est le bon compromis ?

Pour le savoir, les chercheurs ont étudié la taille des cellules de la membrane délimitées par les nervures. Pour une tension donnée, il existe une longueur critique en deçà de laquelle une amorce de fissure est bloquée par les nervures et reste limitée à la cellule. Si la taille des cellules est inférieure à cette longueur critique, les fissures qui y apparaissent sont trop petites, si bien que l'aile résiste à la tension correspondante. En considérant le cas extrême – la force nécessaire pour déchirer la partie la plus fragile de l'aile, la membrane –, les chercheurs ont trouvé une longueur critique de 1,132 millimètre. La plupart des cellules ne dépassant pas 1,0 millimètre, l'aile du criquet est proche de l'optimum.

→ S. B.

PloS ONE, vol. 7(8), e43411, 2012



J.-H. Dirks, D. Taylor/PloS ONE

DERNIÈRE minute ...

DIX ESPÈCES DE PARASITES PAR POISSON
Jean-Lou Justine (MNHN) et des collègues de plusieurs autres pays ont livré les résultats d'une étude menée pendant huit ans dans le lagon néo-calédonien sur les poissons de récifs coralliens et leurs parasites. Ils constatent notamment que pour quatre grandes familles de poissons, dix espèces de parasites en moyenne sont associées à chaque espèce de poisson. Autrement dit, l'extinction d'une espèce de poisson corallien aurait un impact notable sur la biodiversité.

UN PAN NEUF DE CONTRÔLE DANS LE GÉNOME
Ce qu'on prenait pour de l'ADN « poubelle » serait en réalité un vaste panneau de contrôle, indique le projet ENCODE. Les chercheurs impliqués ont étudié l'ADN non codant du génome humain et ont identifié quatre millions d'« interrupteurs », des séquences d'ADN régulant l'expression des gènes, très [illegible] de l'organisme. Finalement, bien que seuls deux pour cent du génome codent des protéines, environ 80 pour cent de l'ADN seraient actifs.

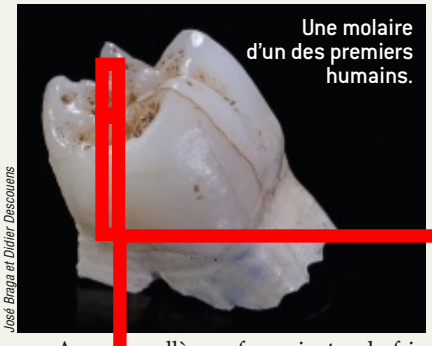
.fr Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

ON EN REPARLE

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

NOS ANCÊTRES CARNIVORES

Lucy et son bébé Selam vivaient dans un delta est-africain, où ces australopithèques avaient un mode de vie en partie arboricole, expliquait Kate Wong en 2007 (voir « Le bébé de Lucy », *Pour la Science*, février 2007, http://bit.ly/PLS352_Wong). Sans doute avaient-ils de ce fait un régime alimentaire opportuniste mêlant fruits, racines, feuilles, charognes…



Une molaire d'un des premiers humains.

José Braga et Didier Descouens

Avec des collègues français et sud-africains, Vincent Balter, de l'École normale supérieure de Lyon, vient de le confirmer dans le cas des australopithèques sud-africains (*Nature*, 9 août 2012). Les chercheurs ont mesuré les proportions de baryum, de strontium et de calcium dans l'émail dentaire d'australopithèques ayant vécu dans la région il y a plus de deux millions d'années, puis dans celui des premiers humains et de leurs contemporains paranthropes (genre éteint d'hominidés), il y a quelque 1,5 million d'années. Baryum et strontium sont en effet métabolisés par l'organisme comme le calcium, de sorte que les carnivores en contiennent moins que les herbivores qui en ont moins que les végétaux, qui eux-mêmes en sont moins riches que le milieu où ils croissent.

Il ressort de ces mesures que, conformément à ce que l'on pensait, le régime alimentaire des australopithèques sud-africains était aussi sans doute omnivore opportuniste, tandis que leurs descendants se sont spécialisés. Ainsi, alors que les paranthropes étaient clairement herbivores, les premiers humains étaient beaucoup plus carnivores, probablement parce qu'en plus de charogner, ils chassaient déjà à l'aide de leurs outils de pierre.

LE TERRIFIANT SUPERVOLCANISME ARCHÉEN

Le volcanisme massif perturbe fortement l'atmosphère, expliquait Ilya Bindeman en 2006 (voir « Les ravages des supervolcans », *Pour la Science*, janvier 2006, http://bit.ly/PLS346_Bindeman). Aujourd'hui, les mégaéruptions sont rares, mais à l'Archéen, il y a 4 à 2,45 milliards d'années, le centre de la Terre dégageait quatre fois plus de chaleur qu'aujourd'hui et elles étaient fréquentes. C'est à partir de cette remarque que Pascal Philippot, de l'Institut de physique du globe de Paris, et ses collègues ont élaboré une explication simple de l'existence de dépôts épisodiques de sulfates à l'Archéen (*Nature Geoscience*, août 2012).

Les sulfates (XSO_4) sont produits dans la haute atmosphère par photolyse (réaction aux ultraviolets) du dioxyde de soufre d'origine volcanique. Dans l'atmosphère anoxique archéenne, ils étaient toutefois immédiatement réduits en sulfures (XS), de sorte qu'en bonne logique chimique, il n'aurait pas dû y avoir de dépôts de sulfates dans les roches archéennes. Pourtant, à trois reprises – il y a 3,5, 3,4 et 3,2 milliards d'années –, des sulfates s'y sont déposés. Pour expliquer cette anomalie, les géochimistes ont proposé divers mécanismes compliqués, voire évoqué de brèves « oasis de vie », c'est-à-dire des apparitions brèves, massives et locales d'oxygène.

Par des analyses pétrographiques et isotopiques de carottes de sédiments prélevées dans des terrains sud-africains, australiens et indiens, l'équipe de P. Philippot a pu établir que dans les roches sulfatées archéennes, les proportions de sulfates et de sulfures sont les mêmes que celles produites aujourd'hui par photolyse quand de grands panaches volcaniques (tel celui du Pinatubo) atteignent la haute atmosphère, où ils sont bombardés d'ultraviolets. Cela suggère qu'à trois reprises, les supervolcans archéens ont émis tant de dioxyde de soufre que le processus qui faisait normalement disparaître les sulfates – leur réduction en sulfure au sein de l'atmosphère anoxique archéenne – est devenu négligeable. Des sulfates ont alors précipité dans les océans, où ils se sont incorporés aux roches sédimentaires archéennes.

UN NOUVEAU BIOCIDE

Les maladies nosocomiales sont des infections contractées à l'hôpital en respirant ou absorbant les spores de bactéries apportées par les autres patients, rappelait Bernard Régnier en 2005 (voir « Les infections à l'hôpital », *Pour la Science*, mai 2005, http://bit.ly/PLS331_Regnier).

L'équipe de Mathias Oulé, de l'Université de Saint Boniface, à Winnipeg au Canada, vient de tester un biocide commercial de la famille de la guanidine nommé *Akwaton* et produit par la Société *Fosfatos Akwaton International* (à Winnipeg). Les chercheurs affirment que ce composé cristallin obtenu par oxydation de la guanine – une base azotée que l'on rencontre notamment dans l'ADN sous forme de nucléotide – dilué à seulement 0,05 pour cent dans l'eau perce en moins de deux minutes à 20 °C les membranes de staphylocoques dorés (intoxications alimentaires), de *Pseudomonas aeruginosa* (diverses graves infections), de *Salmonella choleraesuis* (salmonelloses), de coliformes (diarrhées), de *Clostridium difficile* (inflammation du côlon) et même du staphylocoque doré résistant à la méthicilline (*Journal of Medical Microbiology*, 9 août 2012). Pour comparaison, les solutions à base d'eau oxygénée (volatile) communément utilisées sont à 3 pour cent et celles d'alcool (très volatil) à 70 pour cent. Inodore, incolore, non corrosif et non toxique, ce biocide a déjà été largement utilisé dans l'industrie agroalimentaire et – pour élaborer des bains de bouche. Il devrait maintenant se mettre au service de la lutte contre les maladies nosocomiales.

François Savatier

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

HABITATION ET ASSURANCE

Petit prix, couverture maxi

3 questions à Philippe Perrotin,
agent hospitalier, 2 enfants, propriétaire d'une maison avec jardin à Rennes

Etre bien protégé sans se ruiner, c'est possible ! Assurez votre maison malin grâce à la GMF, et profitez de services et de garanties qui vont vous simplifier la vie.

Pourquoi avoir souscrit à l'assurance DOMO PASS ?

Après avoir trouvé la maison de mes rêves, j'ai aussi déniché le contrat multirisques habitation idéal ! J'ai choisi DOMO PASS formule Confort +, car toutes les garanties sont incluses à un prix vraiment avantageux. Pour à peine 250 euros par an [1], je suis indemnisé en valeur à neuf pour tous les biens sans limite d'âge suite à un sinistre garanti ; le contenu des dépendances et mon jardin sont couverts : mobilier, outillage, arbres… Même les canalisations extérieures sont prises en charge : on m'envoie un prestataire agréé en cas de fuite, de rupture ou d'engorgement.

D'autres services vous ont-ils séduit ?

La GMF a inventé des « plus » qui simplifient vraiment la vie. Avec la garantie « panne électroménager », mes appareils [2] de moins de 5 ans sont réparés par un prestataire envoyé à domicile, ou remplacés si la réparation est impossible, livraison et installation comprises. Nul besoin de m'en occuper !

DOMO PASS

Un prix avantageux, la souplesse en plus

Le contrat DOMO PASS, c'est :
- trois formules pour répondre aux besoins et budget de chacun : Eco pour des garanties essentielles, Confort pour une protection étendue, Confort + pour une protection optimale tout inclus
- une assurance sur mesure : la couverture ou non des objets de valeur, le choix du niveau de franchise, de nombreuses options en formule Confort pour les propriétaires de maison, la prise en compte de tous les modes d'habitation (résidence principale, secondaire, colocation, échange de domicile, maison de retraite, location saisonnière…)
- des garanties à prix malin : l'assurance des appareils nomades pour 7 euros par mois quel que soit le nombre d'appareils, et la garantie « panne électroménager » pour 5 euros par mois [2] (garanties en inclusion en Confort +)
- «Avant'âge 30» pour les jeunes : les locataires de moins de 30 ans bénéficient d'une réduction de 20% sur la formule Confort (pour un logement jusqu'à 3 pièces).

250 € par an
Cotisation
DOMO PASS Confort + [1]

Et la GMF a intégré les nouveaux modes de vie de toute la famille

Oui, c'est important, surtout lorsqu'on a des ados !
A la maison, nous avons deux ordinateurs portables, quatre téléphones mobiles, trois lecteurs MP3, une tablette multimédia, plusieurs appareils photo… La formule Confort + du contrat DOMO PASS couvre tous ces appareils nomades de moins de 5 ans (vol, dommage accidentel…) quel que soit leur nombre ou le lieu du sinistre. Je suis plus serein !

[1] pour une maison de 4 pièces avec jardin située à Rennes
[2] appareils blancs ou bruns

Pour en savoir plus sur ce contrat de la GMF :
Appelez le 0 970 809 809 (numéro non surtaxé) ou connectez-vous sur www.gmf.fr

GMF

SEREC Communication / Juin 2012 - Photo Getty Images - GMF Assurances : 76 rue de Prony, 75857 Paris cedex 17

POINT DE VUE

L'imagerie cérébrale au tribunal ?

L'imagerie anatomique est fiable, alors que l'imagerie fonctionnelle ne répond pas (encore) aux exigences requises par la justice. Les recherches doivent se poursuivre, et les juristes être formés au « neurodroit » – l'usage des sciences du cerveau dans les prétoires.

Olivier GUILLIER

Le 17 février 2008 vers minuit, Jonathan Donahue entre dans un fast-food armé d'un pistolet semi-automatique. Face au refus du gérant de lui remettre l'argent de la caisse, J. Donahue le force à se mettre à genoux, puis le frappe violemment à la tête avec son arme avant de s'enfuir sans argent. Arrêté, il reconnaît l'agression du gérant, resté 20 jours dans le coma, et souffrant désormais de troubles cognitifs et moteurs. Au cours du procès, une expertise psychiatrique conclut que J. Donahue est psychopathe et précise la composante génétique et cérébrale de cette pathologie.

Un procès sert à mettre au jour la vérité judiciaire. Pour ce faire, les propos des témoins, des accusés comme des experts sont évalués par des êtres humains qui écoutent l'exposition de faits et d'éléments contradictoires dont certains sont issus de travaux scientifiques et médicaux. La psychopathie de l'accusé constitue-t-elle un facteur à charge, car l'individu représente un danger pour la société ? Ou à décharge, car il n'est peut-être pas responsable de ses actes ?

Dans le cadre d'une vaste expérience réalisée par des chercheurs en psychologie, droit et philosophie de l'Université de Salt Lake City, dans l'Utah, près de 200 juges américains ont dû statuer sur le cas J. Donahue (fictif, mais inspiré de faits réels). Rendus publics en août dernier dans la revue *Science*, les résultats montrent que les éléments neurobiologiques présentés changent la perception qu'ont les juges de la responsabilité et de la dangerosité de l'accusé. Les juges qui ont bénéficié d'informations relatives à sa psychopathie, présentée comme incurable, ont tendance à diminuer la peine en comparaison de ceux qui n'en ont pas eu connaissance.

Divers travaux scientifiques ont mis en évidence l'influence de la présentation de résultats d'imagerie cérébrale sur les différents acteurs du procès ou encore la fluctuation des décisions de juges en fonction de l'heure de la journée. Ces nouveaux travaux s'inscrivent dans un champ pluridisciplinaire en plein essor : le neurodroit, néologisme désignant les travaux de recherche et de réflexion en psychiatrie, neurosciences, pharmacologie, psychologie, philosophie et droit sur l'utilisation des sciences du cerveau dans le cadre légal.

TOUTE INTERDICTION NOUS PRIVERAIT peut-être d'outils permettant de mieux rendre la justice dans quelques années.

Les neurosciences cognitives et sociales, qui ont connu un formidable développement depuis les débuts de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) il y a plus de 20 ans, informent chaque jour un peu plus les scientifiques, les médecins, voire les juristes sur le comportement humain. Ces travaux et les techniques d'imagerie cérébrale ont-ils leur place dans les prétoires ? Pour le législateur français, la réponse est positive. L'article 45 de la loi (révisée) de bioéthique promulguée le 7 juillet 2011 précise : « Les techniques d'imagerie cérébrale ne peuvent être employées qu'à des fins médicales ou de recherche scientifique, ou dans le cadre d'expertises judiciaires. » Cette disposition légale est une première mondiale. La loi ouvre ainsi la porte au recours à l'imagerie cérébrale dans les tribunaux.

Cette décision encourage à connecter deux niveaux liés, mais distincts : le neurobiologique et le comportement. Toutefois, il existe une difficulté de taille : il n'y a pas de relation directe entre une aire cérébrale et un comportement (anti)social. La complexité structurelle et fonctionnelle du cerveau ainsi que l'interdépendance de la neurobiologie et des facteurs contextuels présents et passés sont trop importantes pour qu'une telle relation linéaire existe.

En 2012, plusieurs institutions publiques françaises ont travaillé sur l'utilisation des neurosciences hors des laboratoires, notamment le Comité consultatif national d'éthique (CCNE), l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques (OPECST) et, plus récemment, le Centre d'analyse stratégique (CAS). Les faits sont là : les données d'imagerie cérébrale peuvent être produites devant un tribunal dans de nombreux pays. Et très récemment, en Italie, une peine pour meurtre a été réduite après que la défense a produit des informations cérébrales et génétiques censées indiquer que l'accusée souffrait de troubles mentaux.

Des voix suggèrent que le recours à l'imagerie cérébrale permis par la loi ne soit fait qu'à décharge dans le cadre d'un procès. Mais cela fait-il sens de considérer l'imagerie cérébrale fonctionnelle comme fiable uniquement pour une utilisation à décharge ?

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

La réponse est non. Soit la technique est fiable dans tous les cas de figure, soit elle ne l'est pas. Mais, en l'état actuel des connaissances théoriques et techniques, l'imagerie fonctionnelle ne répond pas aux indispensables exigences de fiabilité requises dans une procédure légale.

Dès lors, faut-il bannir l'imagerie cérébrale des tribunaux comme d'autres le souhaitent ? Je pense que non. Tout d'abord parce la loi ne différencie pas l'imagerie cérébrale anatomique (ou lésionnelle) de la fonctionnelle. Or l'imagerie lésionnelle est un outil fiable qui peut se révéler indispensable dans certaines expertises psychiatriques, telle la traumatologie. Quant à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, à l'heure où l'expertise psychiatrique dans les tribunaux, bien qu'indispensable, connaît une crise sans précédent, toute interdiction freinerait la recherche et nous priverait peut-être d'outils permettant de mieux rendre la justice dans quelques années.

Aujourd'hui, il semble prudent de repousser l'utilisation de l'imagerie cérébrale fonctionnelle pour l'expertise judiciaire par un moratoire sur cet aspect de la loi, accompagné d'une évaluation périodique de l'état des connaissances. Ce qui, bien sûr, ne remet pas en cause l'apport précieux de l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle pour la recherche scientifique et médicale.

Le droit ne peut donc plus ignorer les éléments neurobiologiques qui participent au comportement humain, celui des prévenus, mais aussi celui des acteurs du procès. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches scientifiques et médicales, mais aussi de développer des formations pour que les juges, avocats et procureurs soient au fait des avancées et des limites des recherches et techniques de psychologie et de neurosciences cognitives et sociales, qu'il s'agisse des questions de responsabilité ou des facteurs influençant les décisions dans les tribunaux.

Aujourd'hui, le neurodroit divise. Pour les partisans, comme pour les opposants farouches, prudence et mesure doivent rester les maîtres-mots. L'avenir d'un très grand nombre d'individus et des changements sociétaux profonds risquent fort de dépendre des avancées dans ces disciplines et ce plus tôt que nous le pensons. ■

Olivier Oullier, professeur à l'Université d'Aix-Marseille Université (UMR7290), est vice-président du Global Agenda Council on Neuroscience and Behavior du Forum économique mondial.

Réagissez en direct à cet article sur **www.pourlascience.fr**

DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'eau comptabilisée à l'échelle européenne

Pour évaluer l'état des écosystèmes aquatiques européens, on a comptabilisé les ressources en eau sur tout le continent et mis en place un outil commun.

Philippe CROUZET

Comment mesurer l'état de l'environnement et la durabilité de son exploitation ? Principalement théorisée par l'INSEE dans les années 1980, la comptabilité de l'environnement vise à quantifier certains paramètres environnementaux, telles les ressources naturelles, considérées comme un capital à préserver. Elle s'inspire de la comptabilité classique : entre une date de départ et une date de clôture, un stock est modifié par des flux et aboutit à un nouveau stock. Elle a été adoptée par l'ONU sous le nom de SEEA (pour *System of Environmental-Economic Accounts*, ou Système de comptabilité économique et environnementale).

L'Agence européenne pour l'environnement (AEE), à Copenhague, au Danemark, a appliqué cette méthode à l'échelle européenne pour permettre à la Commission d'évaluer et d'améliorer les politiques environnementales. L'analyse a d'abord porté sur l'occupation des terres en 2007, puis sur le cycle du carbone en 2012. Aujourd'hui, elle est effectuée sur les services fournis par les écosystèmes (alimentation en nourriture, en eau...).

Cette analyse doit notamment fournir les éléments nécessaires à l'évaluation de la directive cadre sur l'eau. Émise en l'an 2000, cette directive européenne vise à réglementer l'utilisation de l'eau pour préserver les écosystèmes aquatiques, qu'ils soient continentaux ou côtiers. Les stocks sont les lacs, les réservoirs artificiels, les glaciers, les nappes phréatiques... Les flux sont la pluie, l'évaporation, la consommation humaine, les cours d'eau (souterrains ou en surface)... La mer est à la fois source et réceptacle, mais son stock n'est pas comptabilisé.

Les flux d'eau et d'argent présentent des différences notables. On peut épargner l'eau, mais on ne peut ni l'emprunter ni la transférer sans tuyaux ; en d'autres termes, à un instant donné, on ne peut pas irriguer avec l'eau du mois suivant ou avec celle d'un bassin lointain. L'AEE a alors révisé les échelles géographiques [illegible] pour les comptes de l'eau. Ainsi, elle a construit

un référentiel hydrographique, qui répertorie les bassins (divisés en unités élémentaires), les rivières et les lacs dans toute l'Europe. Ce référentiel, nommé ECRINS, est disponible gratuitement sur le site de l'AEE et permet des calculs de bilans hydrographiques. On trace ainsi les consommateurs et les quantités d'eau consommées. Sur le plan temporel, l'échelle de référence choisie pour le calcul des flux est le mois. Ce réajustement des échelles devrait permettre de surmonter les erreurs décelées dans certains comptes de l'eau, effectués par pays et par année.

Faire un bilan comptable nécessite d'harmoniser des données de différentes natures (pluie, débits, prélèvements...), fournies par des organismes variés (météo, services hydrographiques, agences de l'eau...). Dans la plupart des cas, on s'en sert pour calculer les écoulements dans les cours d'eau, qu'on prend comme références pour décrire les systèmes hydrographiques de façon quantitative. En effet, ils intègrent les contributions de tous les processus du cycle de l'eau : la pluie, l'évaporation, la fonte des neiges, le stockage dans des lacs artificiels ou naturels, les prélèvements (pour l'agriculture, l'eau potable...), les rejets (égouts...), etc.

On a ainsi réuni plus de 80 millions de débits journaliers, grâce auxquels on a reconstitué les débits mensuels en des milliers de points pour les huit dernières années. Ces points sont situés à divers endroits de cours d'eau dits principaux (ceux dans lesquels se déversent les affluents), qui s'étendent sur plus de 700 000 kilomètres et dans lesquels s'écoule l'eau issue de bassins versants couvrant plus de quatre millions de kilomètres carrés. Les valeurs ont ensuite été extrapolées sur la totalité du réseau hydrographique.

Toutefois, de nombreuses données manquent encore pour certains pays d'Europe – elles devraient être obtenues dans les années à venir. On manque aussi d'information sur l'utilisation de l'eau par certains secteurs, telles l'agriculture et l'industrie, souvent insuffisamment incitées à fournir ces données. Ainsi, les volumes d'eau consommés pour le refroidissement des appareils industriels et l'irrigation pourraient être très supérieurs à nos estimations. Les systèmes de collecte d'information doivent donc subir d'importantes révisions – à l'exception de ceux des grandes villes, plus fiables, bien que leurs données soient peu accessibles.

Ces insuffisances compliquent l'évaluation de la politique européenne concernant les ressources en eau douce, des enseignements peuvent déjà être tirés. Ainsi, les précipitations représentent

NOS MODÈLES MÉTÉOROLOGIQUES

surestiment systématiquement l'évaporation, d'environ six pour cent en moyenne.

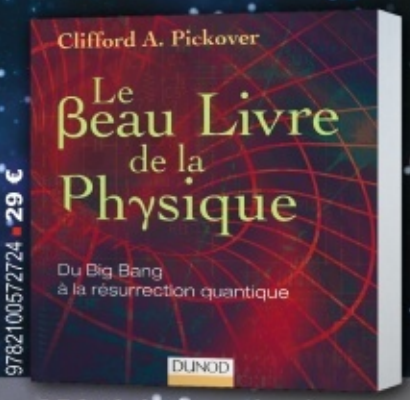
un apport d'eau moyen de 750 millimètres par an (un millimètre équivaut à un litre d'eau par mètre carré), soit 24 000 kilomètres cubes d'eau pour les huit années et le territoire évalués. Plus des deux tiers retournent dans l'atmosphère par évapotranspiration (terme qui regroupe l'évaporation et la transpiration des plantes). En comparant les écoulements de surface mesurés et les données fournies par nos modèles météorologiques, nous avons montré que ces derniers surestiment systématiquement l'évaporation, d'environ six pour cent en moyenne, conduisant à une sous-estimation de la quantité d'eau disponible de 45 millimètres par an. Cette erreur confirme la nécessité de prendre l'écoulement mesuré comme référence.

Ensuite, on dispose désormais d'un instrument harmonisé – même si les données restent à compléter –, commun à toute l'Europe. On peut décrire précisément la demande en eau et en tirer des leçons, tout en prenant en compte les besoins de l'écosystème : effectue-t-on trop de prélèvements par rapport à la ressource ? Faut-il restreindre la consommation lors des saisons sèches ? Doit-on construire des réservoirs supplémentaires au risque de nuire à l'environnement ? Etc. Pour y répondre, les experts pourront se pencher sur les données collectées qui seront publiées fin 2012. ■

Philippe CROUZET travaille pour le programme Systèmes naturels et vulnérabilités, à l'Agence européenne pour l'environnement (AEE, www.eea.europa.eu).

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

VARIEZ LE PLAISIR DES SCIENCES

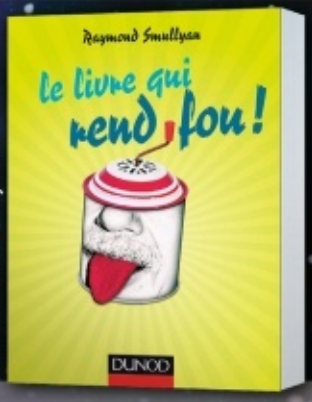


9782100572724 • 29 €

250 théories physiques pour découvrir les clés de notre univers

9782100576398 • 27,50 €

Plongez dans l'énigmatique concept de Multivers : l'Univers de tous les univers possibles

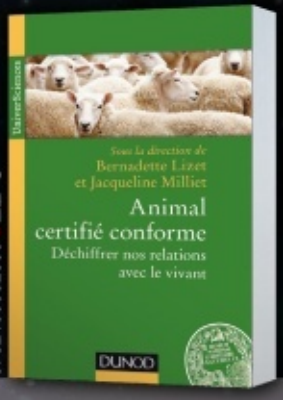


9782100582976 • 16,90 €

Un recueil d'énigmes stimulantes et ludiques écrit avec humour et fantaisie

9782100573059 • 19,90 €

Une cinquantaine de découvertes et de savants qui ont révolutionné la science (presque) par hasard



9782100582853 • 22 €

Protéger la Nature ne suffit plus, il faut la conserver et la gérer

9782100573042 • 22 €

Un voyage au microscope qui nous dévoile l'extraordinaire diversité du monde

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Soif de connaissances scientifiques ?

Plus de 25 % de réduction !

Abonnez-vous 1 an à

POUR LA SCIENCE

1 an ■ 12 numéros

56 € seulement !
(au lieu de ~~74,90 €~~)

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

à retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris Cedex 06

❑ Oui, j'[illegible] **12 numéros de *Pour la Science*** pendant **1 an** au prix de **56 €*** (au lieu de 74,90 € prix de vente au numéro). Je bénéficie également de leur version numérique sur www.pourlascience.fr

* Tarif valable uniquement en France métropolitaine et France d'Outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 12 € - autres pays 25 €.

❑ Je préfère m'abonner uniquement à la version numérique de ***Pour la Science*** pendant **1 an** au prix de **45 €** (au lieu de 62,40 € prix de vente en ligne par numéro) soit 12 numéros consultables et téléchargeables en créant mon compte sur www.pourlascience.fr

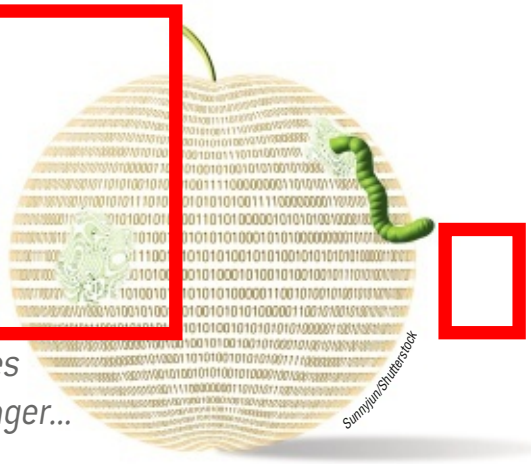
Mon e-mail (une seule adresse possible – Obligatoire pour activer mon abonnement numérique)

|_|_|_

VRAI OU FAUX

Les *Mac* résistent-ils mieux aux virus que les *PC* ?

Non, ou à peine mieux. Les Mac étaient moins victimes de virus, car leur nombre assez faible en faisait des cibles moins intéressantes pour les pirates informatiques, mais la situation commence à change...


Sunnyjan/Shutterstock

Jean-Yves Marion

Récemment, plusieurs virus ont attaqué les *Mac*. Le virus *Flashback*, démasqué en mars de cette année, aurait contaminé environ 600 000 de ces ordinateurs. Dès lors, on s'interroge : les *Mac* sont-ils aussi résistants aux virus qu'on le dit parfois ?

On désigne souvent les programmes malveillants (cheval de Troie, vers...) par le terme générique de virus. Les virus infectent les ordinateurs à des fins variées : voler des informations, envoyer des spams, récolter de l'argent par des mécanismes divers... Ainsi, *Flashback* envoie les internautes vers des sites « pirates », dont les propriétaires paient 0,6 centime d'euro aux concepteurs du virus chaque fois qu'un internaute arrive sur leur site. De tels virus ont donc intérêt à contaminer le plus d'ordinateurs possible.

Pour infecter un système informatique (navigateur Internet, système d'exploitation...), un virus utilise deux méthodes, souvent combinées. La première consiste à inciter l'internaute à cliquer sur un fichier contenant un programme caché, qui s'exécute alors. Le fichier peut être un lien Internet (prétendument destiné à télécharger une mise à jour, par exemple), une image, un document PDF ou *Word*...

La seconde méthode exploite les failles – ou bugs – d'un logiciel. L'utilisateur est vulnérable dès qu'il est connecté à Internet. Par exemple, une faille de *Word*, aujourd'hui corrigée, « ouvrait une porte » lorsque le logiciel chargeait des polices : un programme malveillant pouvait alors s'infiltrer dans l'ordinateur et dicter ses instructions.

Les *Mac* sont-ils moins vulnérables face à ces deux méthodes ? Leurs utilisateurs risquent moins de cliquer sur des liens frauduleux, car ils passent le plus souvent par l'*Appstore* (une plateforme de téléchargement contrôlée par *Apple*), mais le risque n'est pas nul. Quant à la seconde méthode, l'exploitation des failles, il est difficile de se prononcer. À l'origine, *Mac OS*, le système d'exploitation des *Mac*, a été élaboré à partir d'un système *Unix*, qui contient *a priori* moins de failles que les autres : en effet, c'est un logiciel libre (son programme est public), de sorte qu'il est en permanence analysé et corrigé par une vaste communauté d'utilisateurs. Cependant, depuis, *Mac OS* a évolué de façon notable et plus ou moins opaque, perdant probablement cet avantage, tandis que la sécurité de *Windows* a progressé.

Pas de système infaillible

Plus généralement, il est impossible de garantir qu'un programme n'a pas de faille et Fred Cohen, de l'Université de Californie, a montré dans les années 1980 qu'il ne peut exister d'antivirus infaillible. Ces résultats sont liés à l'indécidabilité algorithmique, découverte par le père de l'informatique, Alan Turing, qui aurait eu 100 ans en 2012. Dès lors, tous les systèmes informatiques sont vulnérables : les ordinateurs, les tablettes, les smartphones, les imprimantes... C'est aussi le cas des systèmes industriels, qui sont connectés aux réseaux informatiques et pilotés par des programmes. Ainsi, le virus *Stuxnet* s'est attaqué aux centrifugeuses des centrales nucléaires iraniennes.

La rareté des virus pour *Mac* résulte donc plus de raisons économiques – les *Mac* étant environ 13 fois moins nombreux que les *PC* en 2011 – que d'une sécurité informatique intrinsèque. Les *Mac* sont peut-être un peu plus résistants, notamment grâce à leur système d'exploitation fondé sur *Unix*. Toutefois, si elle existe, cette supériorité est faible et ne résistera pas longtemps lorsque les enjeux économiques justifieront des attaques massives. C'est ce qui commence à se produire. Selon l'entreprise de sécurité informatique *Symantec*, *Flashback* aurait rapporté plus de 8 000 euros par jour à ses concepteurs !

Un moyen simple de limiter les risques d'infection est d'avoir un comportement « raisonnable » sur Internet. Un antivirus est-il utile ? Un *PC* sans antivirus est vite envahi par les codes malveillants. Ce n'est pas le cas des *Mac* pour l'instant, mais, nous l'avons vu, c'est surtout en raison d'un relatif désintérêt des concepteurs de virus. Si les *Mac* acquièrent des parts de marché comparables aux *PC*, les antivirus deviendront nécessaires... ■

Jean-Yves MARION dirige le Laboratoire de haute sécurité (LHS) et est codirecteur du Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (LORIA), à l'Université de Nancy.

Les bienfaits des trous noirs

Caleb Scharf

Le monstre supermassif qui engloutit de la matière au centre de la Voie lactée a peut-être joué un rôle clef dans l'apparition de conditions propices à la vie dans notre région de la Galaxie.

Illustrations de Vault 49

1. LA MATIÈRE QUI TOMBE en tourbillonnant sur un trou noir supermassif rayonne de façon intense. Une partie est expulsée à très grande vitesse dans la galaxie.

Dans quelle mesure l'apparition de la vie sur notre planète est-elle liée à l'état actuel et à l'évolution passée de ce vaste agencement d'étoiles qu'est notre Galaxie ? De nombreux phénomènes cosmiques sont susceptibles d'influer sur l'existence de la vie, mais certains comptent un peu plus que d'autres. Les trous noirs supermassifs – des monstres de millions, voire de milliards de masses solaires tapis au cœur de certaines galaxies – en font partie. Aucun autre objet dans l'Univers ne convertit avec autant d'efficacité la matière en énergie. Aucun n'est capable d'expulser de la matière à une vitesse proche de celle de la lumière, sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Et aucun n'engloutit avec autant de voracité la matière environnante, dans de ponctuels, mais pantagruéliques repas, plutôt que par un grignotage continu.

Le gaz qui tombe sur un trou noir n'a pas une fin tranquille. Il tourne en spirale à très haute vitesse en s'approchant de l'horizon des événements du trou noir (la frontière en deçà de laquelle même la lumière ne peut échapper à l'attraction gravitationnelle de l'astre), et décrit des boucles hyperrapides si le trou noir est lui-même en rotation. Lorsque le matériau qui tournoie rencontre autre chose en chemin, la collision libère une énorme énergie cinétique, convertie en particules accélérées et en rayonnement énergétique. S'ils sont engendrés bien avant l'horizon des événements, ces particules et ces photons peuvent échapper au trou noir et déferlent alors dans l'Univers. C'est un peu comme le bruit d'une baignoire qui se vide : une partie de l'énergie cinétique de rotation de l'eau qui s'engouffre dans la bonde est convertie en ondes sonores à cause des frottements. Ces ondes sonores, plus rapides que l'eau, s'échappent. Dans le cas d'un trou noir, l'énergie expulsée au cours de ces festins de gaz peut avoir des effets à l'échelle de la galaxie tout entière.

Les astronomes qualifient de « cycle d'activité » l'enchaînement des périodes d'activité et des plages de repos d'un trou noir, par analogie avec les cycles d'une machine à laver. La durée du cycle d'activité d'un trou noir décrit la vitesse à laquelle il passe d'une phase d'accrétion de matière à une phase de disette, où il n'a rien à engloutir, et inversement. Le trou noir supermassif au centre de la Voie lactée est aujourd'hui au repos, mais on sait désormais qu'il se réveille de temps en temps. Son cycle serait corrélé à l'évolution globale de la Galaxie. L'histoire du trou noir central éclaire également celle du Système solaire et des conditions propices à la vie qui y règnent.

L'étude des grands relevés de galaxies indique que le cycle d'activité d'un trou noir supermassif est lié au profil de population stellaire de la galaxie qui l'abrite. Les processus qui alimentent en matière le trou noir central influent vraisemblablement sur le type d'étoiles qui peuplent la galaxie, et l'énergie dégagée par un trou noir durant son pic d'activité stimule l'évolution du contenu en étoiles de la galaxie. La population d'étoiles est un indicateur clef pour déterminer la nature d'un système galactique. Les étoiles peuvent être plus ou moins rouges ou bleues. Les étoiles bleues sont les étoiles les plus massives ; elles consomment leur combustible nucléaire à un rythme effréné dans une débauche d'énergie et meurent après quelques millions d'années seulement. Les étoiles rouges, à l'inverse, sont plus petites, moins lumineuses et vivent au bas mot plusieurs milliards d'années.

Trou noir et vieilles étoiles

Si on additionne la lumière issue de toutes les étoiles d'une galaxie, la couleur globale tend soit vers le rouge, soit vers le bleu. Les galaxies rouges sont généralement des galaxies elliptiques, vieilles et massives, tandis que les galaxies plus bleues sont souvent des galaxies spirales, plus actives et plus modestes. Entre ces deux extrêmes, il existe une plage de transition, regroupant peut-être les galaxies dont les étoiles jeunes et bleues meurent et ne sont plus remplacées, entraînant ainsi un rougissement général de la population stellaire. De façon un peu ironique, les astronomes nomment cette zone intermédiaire la « vallée verte ».

Durant le dernier milliard d'années, ce sont les trous noirs centraux des plus grandes galaxies spirales de la vallée verte qui ont eu les cycles d'activité les plus intenses. Dans ces galaxies se trouvent les trous noirs géants qui grossissent et rayonnent de la façon la plus

L'ESSENTIEL

- Les trous noirs supermassifs situés au cœur des galaxies ne font pas qu'engloutir la matière environnante. Ils rayonnent aussi une grande énergie et expulsent de la matière à vitesse très élevée.
- L'activité d'un trou noir central a une influence directe sur sa galaxie hôte. L'énergie libérée agit sur la formation stellaire et régule ainsi le vieillissement de la population d'étoiles.
- La Voie lactée abrite un trou noir de quatre millions de masses solaires, assez actif pour modérer la formation d'étoiles, mais pas assez pour l'étouffer complètement. Un juste milieu sans lequel la vie n'aurait probablement pas pu se développer.

régulière dans l'Univers actuel. La population d'étoiles de chacune d'elles est de l'ordre de 100 milliards de masses solaires. Dans une telle galaxie, il y a beaucoup plus de chances d'apercevoir les signes d'un trou noir en train d'engloutir de la matière que dans tout autre type de galaxie. Une sur dix environ abrite un trou noir supermassif actif. En termes statistiques, ces trous noirs s'allument et s'éteignent en permanence.

Le lien entre le fait qu'une galaxie soit située dans la vallée verte et le comportement de son trou noir central est une énigme. La vallée verte est une zone de transition, et la plupart des galaxies sont plutôt rouges ou plutôt bleues. Une galaxie qui se trouve dans la vallée verte est en train de changer ; il se peut que les étoiles cessent de s'y former. Les trous noirs supermassifs peuvent avoir cet effet dans d'autres environnements, tels les amas de galaxies et les grandes galaxies jeunes. Ils pourraient faire évoluer les galaxies du bleu vers le rouge, en passant par la vallée verte. À moins que ce ne soient les facteurs responsables de la transformation d'une galaxie qui aient aussi pour effet d'alimenter le trou noir en matière.

En étudiant les galaxies spirales voisines, les astronomes ont en effet trouvé des signes indiquant que les trous noirs les plus actifs ont influé sur leurs galaxies hôtes à des milliers d'années-lumière à la ronde. Dans certains cas, l'intense rayonnement ultraviolet et X émanant du disque d'accrétion des trous noirs peut chauffer des nuages de gaz environnants et les propulser vers l'extérieur. Ces « vents » balayent alors les régions de formation stellaire, à la façon de fronts chauds s'abattant sur un pays. On ne sait pas exactement comment cela influe sur la production d'étoiles, mais c'est une force puissante.

De même, des événements qui déclenchent l'activité du trou noir peuvent aussi agir à grande échelle sur la galaxie. Par exemple, la chute d'une galaxie naine capturée par le puits de gravité d'une galaxie plus grande remue du matériau galactique, qui va alors tomber vers le trou noir et l'alimenter. C'est comme souffler sur les braises d'un feu pour ranimer les flammes. Les effets gravitationnels et les ondes de pression dus à cette galaxie naine incidente peuvent aussi atténuer ou réprimer la formation stellaire ailleurs dans le reste de la galaxie. Ces phénomènes pourraient expliquer pourquoi l'activité d'un trou noir supermassif est grossièrement corrélée avec l'âge des étoiles de sa galaxie hôte, donc avec la couleur de celle-ci.

Or les astronomes se sont récemment rendu compte que la Voie lactée est elle-même un de ces grandes galaxies de la vallée verte. Cela suggère que le trou noir central devrait avoir un cycle d'activité rare, ce qui est une surprise. En effet, le trou noir de notre Galaxie ne semble pas particulièrement actif. Invisible, il trahit surtout sa présence par son attraction gravitationnelle, qui influe sur l'orbite des étoiles du noyau galactique. L'analyse de leurs trajectoires suggère que le trou noir central de la Voie lactée ne ferait que quatre millions de masses solaires. Un fretluquet. Et pourtant, à en croire les observations des autres galaxies, ce devrait être l'un des plus actifs.

Nous sommes bien sûr tentés d'afficher un certain scepticisme : rien ne nous avait jusqu'ici laissé penser que notre Galaxie accueillait un trou noir supermassif particulièrement affamé. Mais peut-être que tout cela n'est qu'un « hasard du calendrier », l'échelle de temps humaine étant très brève par rapport à celle du cosmos.

DANS LA VALLÉE VERTE, UNE GALAXIE SUR DIX

environ abrite un trou noir supermassif en activité. Il ferait évoluer la galaxie du bleu vers le rouge.

Des indices d'une activité récente

Il semble en effet que les choses étaient très différentes il n'y a pas si longtemps. Il y a quelques années, une émission X intense provenant de nuages interstellaires de gaz distants de 300 années-lumière du centre galactique a été observée. Ces nuages n'ayant aucune raison de briller en rayons X par eux-mêmes, il s'agissait d'un rayonnement par réflexion. Et la configuration de ces nuages indique que la source se situe près du centre galactique ; on déduit de l'intensité de l'émission par réflexion observée aujourd'hui que le trou noir central était un million de fois plus brillant 300 ans plus tôt.

En 2010, une équipe de l'Université Harvard a annoncé la découverte d'une structure ténue, mais gigantesque, dans le rayonnement gamma provenant de l'intérieur de la galaxie. Cette structure ressemble à deux énormes bulles prenant naissance au cœur de la Voie lactée et s'étendant sur 25 000 années-lumière de part et d'autre du disque galactique. Ces bulles sont sans doute le reliquat de l'éjection de matière par le trou noir central il y a moins de 100 000 ans, lors d'un épisode d'intense activité et de croissance.

Les indices s'accumulent et livrent un tableau cohérent de notre environnement galactique. Si la Voie lactée obéit aux mêmes règles que celles constatées dans des dizaines de milliers d'autres galaxies, elle doit abriter un trou noir qui s'active régulièrement. Ce n'est peut-être pas le plus gros, ni celui qui dégage le plus d'énergie quand il engloutit de la matière, mais c'est un objet actif, une tempête à notre porte. Cette machine gravitationnelle peut se rallumer à tout moment.

La Voie lactée et son trou noir central semblent avoir dans l'Univers actuel un statut à part, qui indique un lien possible entre l'environnement cosmique et l'apparition de la vie. Les conditions nécessaires à la vie dans l'Univers font l'objet d'un débat philosophique. Selon les partisans du « principe anthropique », notre existence impose que l'Univers respecte certaines conditions propices à la vie, puisque nous sommes là. Cela nous place dans une position privilégiée : il suffirait que certaines lois fondamentales ou certaines constantes de la physique soient légèrement différentes pour que l'Univers soit incompatible avec la vie.

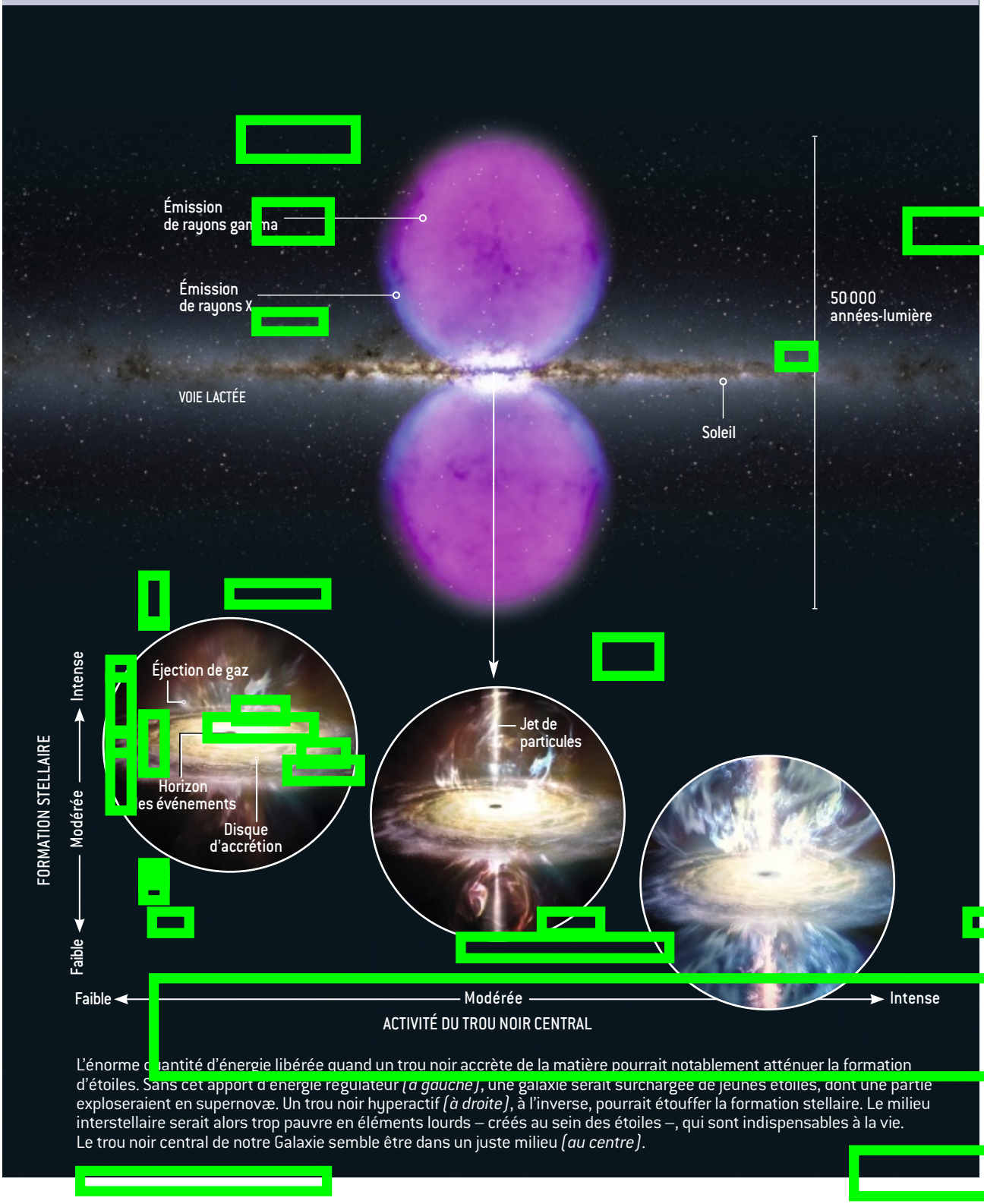
De nombreux scientifiques refusent cependant cette interprétation, et sont attachés au principe copernicien selon lequel nous n'avons rien de particulier. De même que la Terre n'est pas au centre du Système solaire, il n'existe pas de région privilégiée dans l'Univers, qui est semblable dans toutes les directions.

Une solution pour évacuer ce problème est de faire appel à l'idée des univers multiples. Si notre Univers n'est qu'un parmi une infinité d'autres dans un multivers plus vaste, alors nous existons peut-être simplement dans celui où règnent les conditions propices à la vie. Il n'aurait rien de spécial : ce serait juste comme une île jouissant du bon climat, parmi d'autres moins hospitalières.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

LES EFFETS À GRANDE ÉCHELLE DES TROUS NOIRS

Le trou noir supermassif de la Voie lactée n'est qu'un point à l'échelle de la galaxie. Mais avec quatre millions de masses solaires, [illegible] un coup d'éclat. En 2010, les astronomes ont identifié deux bulles émettrices de rayons gamma s'étendant sur 25 000 années-lumière de part et d'autre du centre galactique, où réside le trou noir supermassif. Ces bulles seraient les vestiges d'un sursaut d'activité du trou noir dans un passé assez récent, durant lequel [illegible] rayonnement énergétique et de particules accélérées. Heureusement, cette bouffée n'était pas dirigée vers les marges du disque galactique, où réside le Système solaire.



L'énorme quantité d'énergie libérée quand un trou noir accrète de la matière pourrait notablement atténuer la formation d'étoiles. Sans cet apport d'énergie régulateur *(à gauche)*, une galaxie serait surchargée de jeunes étoiles, dont une partie exploseraient en supernovæ. Un trou noir hyperactif *(à droite)*, à l'inverse, pourrait étouffer la formation stellaire. Le milieu interstellaire serait alors trop pauvre en éléments lourds – créés au sein des étoiles –, qui sont indispensables à la vie. Le trou noir central de notre Galaxie semble être dans un juste milieu *(au centre)*.

Cela nous amène à préciser la longue liste des facteurs propices à l'apparition de la vie. Il est frappant que la Voie lactée se trouve juste dans la situation favorable où son trou noir supermassif est actif. Il est possible que ce ne soit pas une simple coïncidence.

Le calme règne en banlieue galactique

Notre Système solaire subit-il des conséquences directes de l'activité d'un trou noir situé à quelque 25 000 années-lumière ? Ce dernier favoriserait-il la formation de planète dans notre banlieue galactique ? Quand le trou noir central s'active, avalant de la matière et recrachant de l'énergie, il n'est probablement pas très lumineux vu depuis notre voisinage. Les énormes bulles émettrices de rayons gamma qui s'étendent à l'extérieur du disque galactique trahissent certes une débauche d'énergie considérable, mais pas dirigée vers nous. Si des événements plus importants se sont produits, cela devait être dans un passé lointain, peut-être avant la formation de notre Système solaire il y a 4,5 milliards d'années. Depuis, le monstre central n'a vraisemblablement eu qu'un impact limité sur les lointaines banlieues galactiques telles que la nôtre.

Du point de vue de la vie, cela pourrait être une bonne chose. La Terre serait perturbée par une forte augmentation du bombardement ambiant de particules et de photons très énergétiques, originaires du centre galactique. Un tel rayonnement peut avoir un effet délétère sur les organismes et même affecter la structure et la composition de l'atmosphère et des océans. Nous serions peut-être relativement épargnés à 25 000 années-lumière du centre galactique, mais si nous habitions plus près, cela serait une autre affaire. Le fait que nous n'habitions pas sur une planète plus centrale n'est peut-être pas une coïncidence. De même, nous ne devrions peut-être pas nous étonner de nous trouver ici maintenant, et non pas des milliards d'années plus tôt ou plus tard.

Notre Galaxie a, comme tant d'autres, coévolué avec son trou noir supermassif. De fait, le rapport entre les trous noirs supermassifs et leurs galaxies nous fournit un véritable outil pour évaluer l'histoire galactique. Les quasars, des trous noirs supermassifs extrêmement puissants que l'on observe dans l'Univers lointain, se trouvent en général dans les plus grosses galaxies elliptiques, situées au centre des amas de galaxies. Ces galaxies se sont formées de façon violente, rapide et précoce : aujourd'hui, leurs étoiles sont vieilles et le gaz qu'elles renferment est trop rare, trop dense et trop chaud pour former de nouveaux systèmes stellaires. D'autres galaxies elliptiques semblent s'être formées plus tard par fusion de galaxies. Un certain phénomène y a mis en sommeil la formation d'étoiles. Le dégagement d'énergie des trous noirs supermassifs est un excellent candidat pour ce rôle de régulateur. Les galaxies spirales dotées de bulbes centraux d'étoiles bien marqués présentent également les signes d'une histoire commune avec leurs trous noirs centraux. Elles partagent certains traits avec les galaxies elliptiques. Dans les unes comme dans les autres, la masse du trou noir central vaut environ un millième de la masse du bulbe ou des étoiles qui l'entourent. Ainsi, le bulbe imposant de notre voisine Andromède contient un trou noir 20 fois plus massif que celui de la Voie lactée.

Plus bas dans la hiérarchie, il y a les galaxies sans bulbe, comme c'est le cas de nombreuses spirales. Bien que la Voie lactée soit une grande galaxie, elle abrite un trou noir assez chétif. La quasi-absence de bulbe s'explique est un mystère : soit la galaxie avait initialement moins de matière brute à disposition pour former un bulbe d'étoiles, soit le trou noir n'a jamais joué son rôle régulateur, soit trop peu de petites galaxies satellites ont été absorbées au fil du temps.

Les galaxies naines sont, pour leur part, dépourvues de trous noirs centraux. Enfin, les véritables microbes du zoo galactique sont des objets rassemblant à peine quelques dizaines de millions d'étoiles, et presque dénuées de gaz ou de poussière susceptibles d'en former de nouvelles. Et celles qui sont riches en gaz sont extrêmement pauvres en étoiles.

La Voie lactée fabrique encore des étoiles à un rythme d'environ trois masses solaires par an. Ce n'est pas beaucoup à l'échelle d'une vie humaine, mais cela fait quelque dix millions de nouvelles étoiles depuis que nos ancêtres se sont redressés pour marcher quelque part en Tanzanie. C'est une productivité honorable pour une région d'un univers qui a 13,7 milliards d'années. Les galaxies géantes de l'univers jeune, brillant du feu des quasars qui dévorait leur cœur, se sont assoupies depuis longtemps. Les débordements d'énergie de [illegible]

■ L'AUTEUR

Caleb SCHARF est directeur du Département d'astrobiologie à l'Université Columbia, aux États-Unis. Il tient le blog *Life, Unbounded* pour *Scientific American*.

Article adapté de C. Scharf, *Gravity's Engines : How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars and Life in the Cosmos*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2012.
©Caleb Scharf, 2012.

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Scharf, **Gravity's Engines : How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars and Life in the Cosmos**, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2012.

K. Weaver, **Les trous noirs supermassifs**, *Dossier Pour la Science* n° 75, avril-juin 2012. http://bit.ly/doss75_trousnoirs

J. Greene, **À la recherche des trous noirs de masse intermédiaire**, *Pour la Science* n° 413, mars 2012. http://bit.ly/413_greene

W. Tucker *et al.*, **Le souffle des trous noirs**, *Pour la Science* n° 354, avril 2007. http://bit.ly/354_tucker

A. Barger, **Cosmos : la crise de l'âge mûr**, *Pour la Science* n° 328, février 2005. http://tiny.cc/328_barger

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

2. LA GALAXIE ELLIPTIQUE CENTAURUS A abrite un trou noir central dont la masse est estimée à 55 millions de fois celle du Soleil. Il est à l'origine de ces immenses jets de matière qui s'échappent du centre galactique et qui sculptent de gigantesques bulles dans le milieu interstellaire, visibles en rayons X *(en bleu)* et en infrarouge *(en orange)*. Le disque de poussière (visible en infrarouge) qui barre la galaxie témoigne de l'absorption récente d'une galaxie.

centraux ont étouffé la formation de nouvelles étoiles ; les ondes de pression de leurs bulles d'éjectats empêchent le milieu interstellaire de se refroidir et de se condenser en étoiles et en planètes. Pendant ce temps, la Voie lactée continue d'avancer à son train de sénateur.

Un trou noir ni trop actif ni trop endormi

Le fait que nous vivions dans une grande galaxie dotée d'un bulbe stellaire peu développé et d'un trou noir central modeste suggère que les galaxies les mieux adaptées à la vie sont celles qui n'ont pas passé leur temps à faire croître des trous noirs colossaux et à subir les effets des forces déchaînées par le processus. De nouvelles étoiles continuent à se former dans notre Galaxie, mais pas avec la même vigueur que dans d'autres. La plupart des nouvelles étoiles se forment sur les bords des bras spiraux, sous l'effet des ondes de pression à grande échelle qui balayent le disque de gaz et de poussière. Les étoiles se forment également plus loin du centre galactique que dans le passé. Nous vivons dans une région de formation stellaire modérée. Une formation stellaire intense produit un environnement très chaotique. Des étoiles massives naissent, qui épuisent rapidement leur combustible et meurent bientôt dans de colossales explosions de supernovæ. Les atmosphères planétaires peuvent être soufflées par le rayonnement intense de ces étoiles, et les particules énergétiques accélérées peuvent pilonner la surface des planètes. Même le flux de neutrinos produits par les explosions d'étoiles suffirait à emporter atteinte à la vie. Et ce ne sont que les effets modérés : trop près d'une supernova, un système planétaire risque d'être purement et simplement vaporisé.

Et pourtant, ces mécanismes sont aussi ceux par lesquels le riche mélange chimique engendré au sein des étoiles est disséminé dans le cosmos. Ce matériau est celui dont sont faites les étoiles et les planètes. Il s'agit de planètes comportant des hydrocarbures et de l'eau, brassés par la chaleur produite par les radio-isotopes, ayant évolué elles des milliards d'années d'évolution géophysique. Ainsi, quelque part entre la région où les jeunes étoiles se forment à foison et celle où dorment les vieilles étoiles, il y a un endroit « juste comme il faut », suffisamment éloigné du centre galactique vieillissant, mais pas trop près des zones agitées de formation stellaire. Notre Système solaire s'y trouve.

La contrainte que font peser les trous noirs supermassifs sur la possibilité de la vie est simple : une galaxie contenant un trou noir de taille modérée qui s'alimente de façon régulière et sans excès a plus de chance d'abriter une zone « tempérée » qu'une galaxie dotée d'un colosse autrefois vorace mais assoupi depuis longtemps. L'existence de galaxies telles que la Voie lactée est intimement liée aux processus contraires d'accrétion et d'éjection de matière par les trous noirs centraux. Trop d'activité et la formation d'étoiles serait faible. La production d'éléments lourds cesserait alors. Trop peu d'activité, et les jeunes étoiles explosives seraient trop abondantes ou, au contraire, le milieu interstellaire ne serait pas assez brassé pour donner naissance à quoi que ce soit. Si l'on modifie tant soit peu cet équilibre, on modifie tout le processus de formation d'étoiles et d'évolution des galaxies.

La chaîne d'événements qui a conduit à la vie serait différente, voire inexistante, sans la coévolution des galaxies avec les trous noirs supermassifs et leur effet régulateur. Le nombre d'étoiles, la proportion de petites et de grosses étoiles, la forme des galaxies, leur structure, les régions stérilisées ou au contraire dynamisées par le rayonnement et les ondes de pression – tout cela serait différent sans les trous noirs supermassifs.

Notre petit coin fertile du cosmos a subi les influences de tout ce qui s'est passé autour de lui, y compris du comportement du trou noir niché au centre de la Voie lactée. Ces objets, eux-mêmes coupés du reste de l'Univers, ont joué un rôle majeur dans son évolution. Nous leur devons beaucoup. ■

L'art de la construction chez les insectes sociaux

Guy Theraulaz, Andrea Perna et Pascale Kuntz

Les termitières et les fourmilières sont des prouesses architecturales. Pourtant, chaque ouvrier bâtisseur n'a qu'une perception locale du nid qu'il construit. Des modèles simples révèlent leurs secrets.

1. DES TERMITES de l'espèce *Hospitalitermes hospitalis* (Sarawak, Malaisie) transportent des boulettes de lichen et de mousse qui leur serviront de nourriture ou de support pour cultiver des champignons. Comme tous les insectes sociaux, les termites coopèrent pour se nourrir, mais aussi pour bâtir des nids à l'architecture étonnante. Les éthologues étudient les mécanismes coopératifs conduisant à ces structures.

©Ch'ien Lee/Minden Pictures/Corbis

En 1948, à proximité des berges du fleuve Sankuru, à quelques kilomètres en aval de Lusambo, dans ce qui est aujourd'hui la République démocratique du Congo, le naturaliste luxembourgeois Édouard Luja découvrit un nid de termites de forme très étrange. Sa structure ne ressemblait à aucune des formes connues, et son aspect extérieur laissait plutôt penser à un petit objet en terre cuite façonné par quelque habile potier qu'à un nid construit par des insectes sociaux.

Le nid avait été découvert dans un sol sablonneux entre 20 et 50 centimètres de profondeur. Son aspect extérieur surprenait par la régularité et la symétrie des détails de sa structure. De forme ovoïde et d'une dizaine de centimètres de haut, sa surface était couverte de petits orifices en forme de gargouilles disposées en lignes, régulièrement espacées et qui parcouraient toute la circonférence externe de la paroi *(voir la figure 2)*. Mais le plus spectaculaire se trouvait à l'intérieur : une succession de chambres, délimitées par des planchers et plafonds parallèles et régulièrement espacés. Des rampes hélicoïdales assuraient la communication entre les différents étages. Par ailleurs, l'intérieur de la paroi externe était percé d'une série de galeries circulaires. Ces galeries communiquaient avec l'intérieur du nid par de minuscules fentes transversales s'ouvrant entre les planchers successifs, et elles étaient également reliées aux gargouilles externes par de minuscules pores *(voir la figure 3)*.

Les termites qui ont développé l'art de la construction jusqu'à un tel degré de raffinement appartiennent au genre *Apicotermes* et vivent dans la forêt et la savane africaines. Ils ont été beaucoup étudiés dans les années 1950, notamment par le naturaliste belge Jules Desneux, mais, jusqu'à aujourd'hui, personne n'avait percé le mystère de leur construction. Comment des insectes au comportement rudimentaire parviennent-ils à construire de tels chefs-d'œuvre ? À quelles lois la structure interne de ces nids obéit-elle ? Ces questions ont constitué le cœur d'un projet interdisciplinaire débuté fin 2006, destiné à mieux comprendre les mécanismes intervenant dans la construction des nids en terre chez les termites et les fourmis, ainsi que les caractéristiques et les propriétés de ces architectures. Des réponses se dessinent et révèlent le rôle essentiel joué par les processus d'auto-organisation.

On recense à ce jour environ 2 600 espèces de termites et plus de 12 500 espèces de fourmis. Alors que les sociétés de fourmis sont de type matriarcal et sont généralement fondées par une seule reine, les sociétés de termites sont constituées d'individus mâles et femelles et sont fondées par un couple royal. Le fonctionnement de ces sociétés repose sur des systèmes de communication élaborés et sur une division du travail au sein de la caste ouvrière, qui se manifeste notamment par des différences morphologiques : certains individus défendent la colonie, d'autres construisent le nid, d'autres encore recherchent de la nourriture…

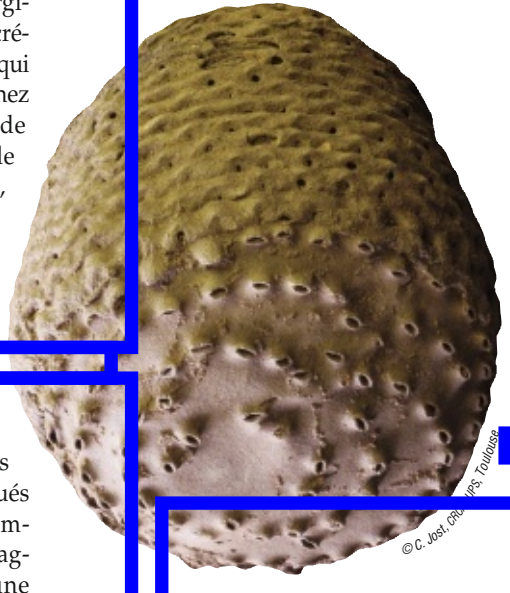
Des nids de boulettes de terre régurgitées

Chez ces insectes sociaux, l'activité de construction est très répandue. Les termites construisent des nids de tailles et de formes variables. Ils sont généralement constitués d'un ensemble complexe de cavités interconnectées, reliées au milieu extérieur par un réseau de galeries souterraines ou couvertes. Ces nids sont construits sous terre (hypogés), sur le sol (épigés), sur les arbres ou dans le bois ; ils combinent parfois des parties hypogées et épigées. Ils sont bâtis soit au moyen de boulettes de terre régurgitées, mélangées à de la salive et des excréments, soit uniquement d'excréments, qui forment en séchant un carton solide. Chez les fourmis, il existe aussi une grande variété de nids, construits à partir de matériaux divers : feuilles, brindilles, aiguilles de pin, carton de bois ou boulettes de terre. Les nids de fourmis sont arboricoles ou souterrains, ou combinent des parties hypogées et épigées ; mais la forme la plus répandue consiste en un réseau souterrain de galeries ramifiées reliant un ensemble de chambres.

Les nids sur lesquels nous avons concentré notre attention sont constitués de réseaux alvéolaires. Le point commun à toutes ces structures est la fragmentation de l'espace habité en une multitude de chambres cloisonnées, mais interconnectées par de petits passages. Ces chambres sont soit isolées les unes des autres par des parois épaisses, soit disposées en étages réguliers, soit organisées selon une structure beaucoup plus irrégulière, de type spongiforme *(voir le portfolio en 3D page 36)*.

L'ESSENTIEL

- Termites et fourmis construisent des nids à l'architecture étonnante tant elle est régulière et symétrique.
- La modélisation informatique du nid et de sa construction éclaire l'édification de telles structures.
- Chaque ouvrier bâtisseur dépose des boulettes d'argile là où elles abondent déjà.
- La coordination des activités de construction émerge de ces comportements individuels par un processus d'auto-organisation.



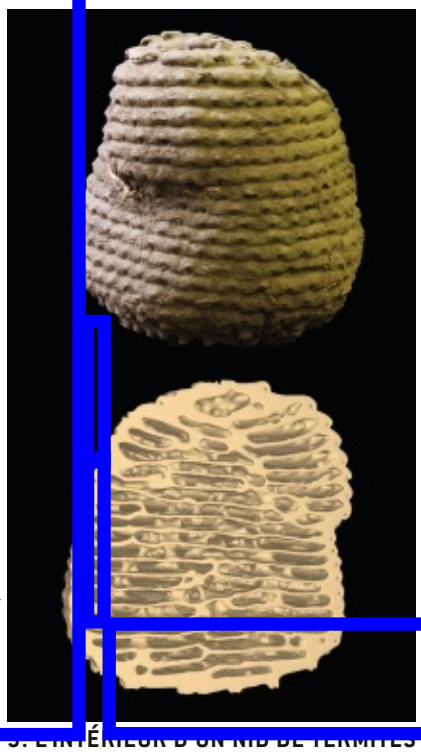
© C. Jost, CRCA, UPS, Toulouse

2. LES NIDS DES TERMITES du genre *Apicotermes* présentent sur leur surface externe des microstructures régulièrement espacées qui s'ouvrent sur des corridors circulaires logés dans la coque du nid. De 10 à 20 centimètres de largeur, ces nids sont construits à une profondeur d'environ 30 à 60 centimètres dans le sol. Le nid est entouré d'un espace vide ou rempli de sable.

La principale fonction de ces nids est la protection de la colonie contre les prédateurs et le maintien de conditions de température et d'humidité qui permettent le développement de la colonie. Cependant, ces enceintes confinées confrontent leurs habitants à d'autres difficultés. D'une part, il faut réguler les échanges gazeux et assurer un renouvellement de l'oxygène, ce qui nécessite l'adaptation des architectures. D'autre part, il s'agit de circuler efficacement au sein de ces structures. En effet, la complexité du réseau de communication entre les chambres croît à mesure que la taille du nid augmente. Comment les voies de communication sont-elles organisées au sein du nid ? Certaines topologies du réseau favoriseraient la circulation des insectes entre différentes zones. La topologie des connexions jouerait aussi un rôle dans la protection des parties vitales du nid en ralentissant la progression des intrus. Dans quelle mesure la structure des nids satisfait-elle ces différentes contraintes fonctionnelles ?

Pour répondre à ces questions, nous avons développé plusieurs outils permettant de visualiser et caractériser la structure tridimensionnelle des nids. Tout d'abord, nous avons numérisé l'ensemble des nids dont nous disposions (120) au moyen d'un tomographe à rayons X. Certains nids ont été récoltés au cours de missions réalisées en Afrique et en Amérique du Sud, et d'autres provenaient de différentes collections appartenant aux Muséums d'histoire naturelle de Paris et de Toulouse. À partir des données du tomographe, nous avons reconstruit en trois dimensions la structure des nids, ce qui nous a permis de naviguer virtuellement au sein de ces architectures et d'en extraire de nombreuses mesures. Nous avons ainsi cartographié les réseaux d'interconnexion entre les chambres à l'intérieur des nids et analysé leur organisation spatiale et leur topologie grâce aux outils de la théorie des graphes *(voir l'encadré ci-dessous)*. Dans cette représentation, chaque chambre dans le nid correspond à un nœud du réseau et chacune des galeries reliant deux chambres est figurée par une arête.

Chez les termites *Cubitermes*, par exemple, que nous avons étudiés avec Christian Jost, du Centre de recherches sur la

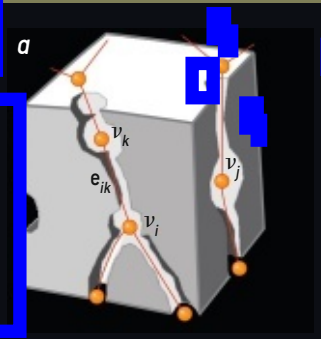


Sauf mention contraire, les illustrations sont des auteurs

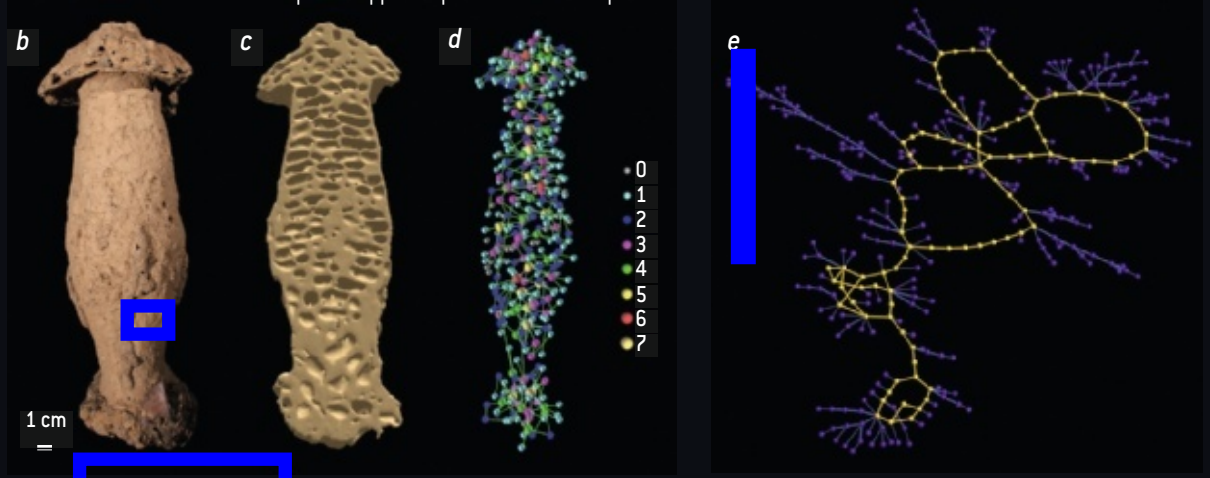
3. L'INTÉRIEUR D'UN NID DE TERMITES *Apicotermes* reconstitué par tomographie à rayons X. L'épaisseur des cloisons est inférieure à un millimètre.

DES GRAPHES POUR ANALYSER LA STRUCTURE DES GALERIES

On étudie le réseau de communication dans le nid à l'aide de la théorie des graphes. Un graphe est un objet mathématique composé de nœuds et d'arêtes qui décrivent une relation entre des objets. Par exemple, dans le nid, chaque nœud ν_i représente une chambre, et il existe une arête e_{ij} entre deux nœuds ν_i et ν_j s'il existe une galerie entre les chambres correspondantes *(a)*.



La représentation du réseau tridimensionnel de connexions d'un nid – ici d'une termitière du genre *Cubitermes (b)* reconstituée par tomographie à rayons X *(c)* – permet de visualiser le degré de connectivité de chaque chambre et sa position dans le réseau *(d)* : la couleur de chaque nœud (chambre) varie selon le nombre de galeries qui lui sont raccordées. La représentation en deux dimensions du réseau *(e)* montre qu'une grande partie du réseau *(en bleu)* peut être facilement déconnectée du reste de la structure : il suffit d'obstruer un seul nœud ou une seule arête pour stopper un prédateur arrivant par un chemin bleu.



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

cognition animale à Toulouse, et Sergi Valverde, du Laboratoire des systèmes complexes à Barcelone, les réseaux de communication présentent une faible connectivité. Chaque chambre n'est connectée en moyenne qu'à un peu plus de deux autres, soit quatre à cinq fois moins que si elle avait été reliée à toutes les chambres adjacentes. Il est rare de trouver des chambres ayant plus de trois ou quatre connexions. En outre, de grandes voies de communication parcourent l'ensemble du nid, sur lesquelles sont greffés des groupes de chambres en arborescence : chaque groupe n'est ainsi relié aux grandes voies que par un seul tunnel.

Cette organisation particulière du réseau pourrait favoriser la défense du nid. En effet, si des prédateurs – des fourmis, par exemple – s'introduisent dans le nid à partir d'une chambre située en périphérie, il suffit aux soldats termites de bloquer un seul tunnel (celui qui relie le groupe de chambres concerné aux grandes voies de communication), dont le diamètre correspond à celui de leur tête, pour que la zone envahie soit déconnectée du reste du nid.

La structure permet aussi de relier rapidement différentes zones du nid. En effet, la longueur moyenne des déplacements nécessaires pour relier deux chambres est beaucoup plus faible que celle obtenue pour des réseaux présentant les mêmes contraintes spatiales, mais où toutes les chambres adjacentes sont interconnectées. Un tel nid aurait cinq fois plus de connexions entre les chambres, sans que la longueur moyenne des chemins entre deux chambres ne soit diminuée pour autant. Ainsi, chez certaines espèces de termites, l'organisation à grande échelle du réseau de communication au sein du nid est loin d'être triviale.

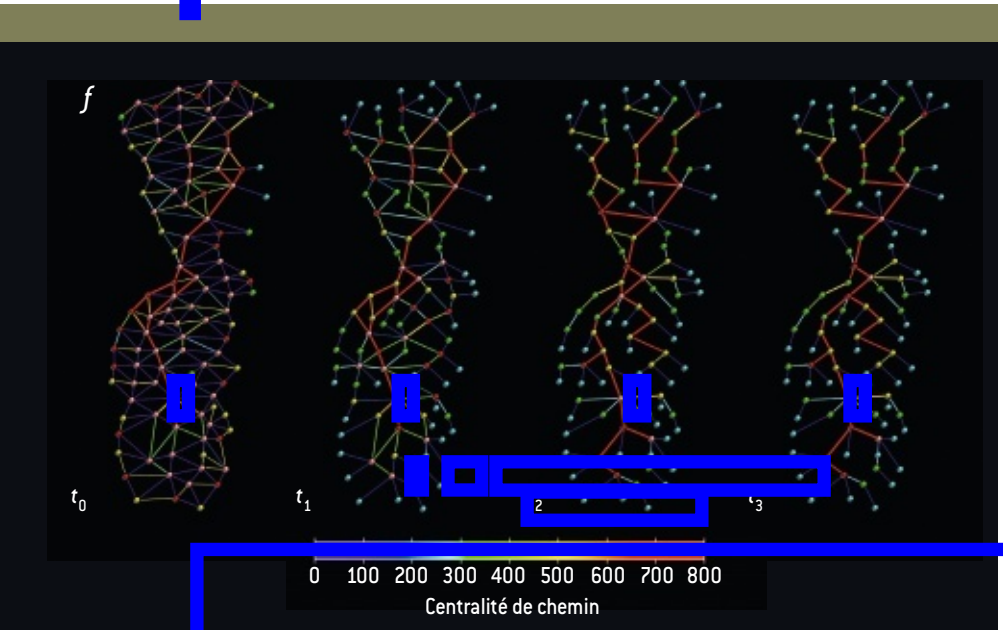
Comment ces insectes optimisent-ils une propriété globale du réseau, alors qu'ils n'ont qu'une perception locale de leur environnement ? L'étude de différents modèles de formation de réseaux de connexions entre les chambres d'un même nid nous a conduits à formuler l'hypothèse suivante : l'optimisation reposerait sur la capacité des insectes à estimer une autre propriété du réseau, la centralité d'une arête. La centralité est une mesure de l'importance d'une arête pour la circulation à l'intérieur d'un réseau : sa valeur correspond au nombre total de plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds qui passent par cette arête.

Pour évaluer la centralité d'une arête, il suffirait aux insectes d'utiliser comme information la quantité de phéromone présente sur chacune des branches du réseau sur lesquelles ils se déplacent. Les termites, comme les fourmis, utilisent ces signaux chimiques déposés sur le sol pour communiquer et guider leurs déplacements vers les zones de récolte. La phéromone utilisée par les termites s'accumule donc sur les voies de communication les plus passantes, c'est-à-dire sur les arêtes les « plus centrales ».

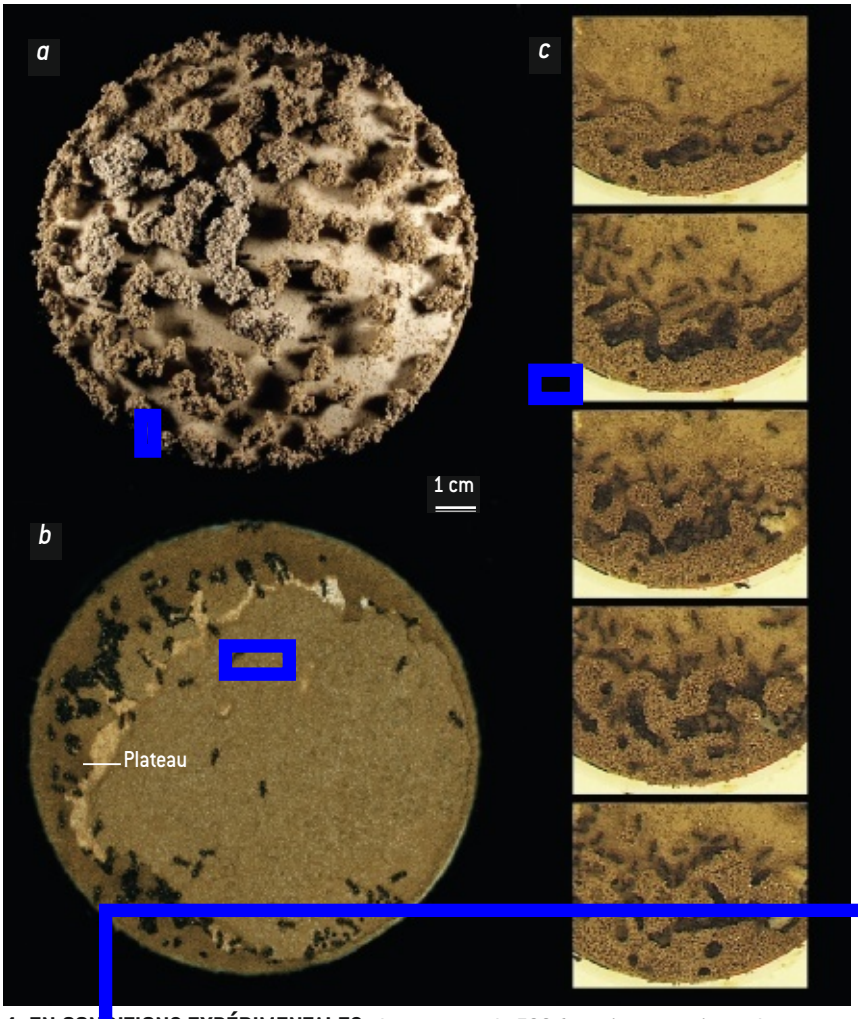
Préserver les voies les plus passantes

Notre modèle élimine du réseau les arêtes sur lesquelles il y a le moins de passages ; seules subsistent les voies de communication les plus importantes. Nous savions en effet qu'au cours du temps, les termites remanient la structure du réseau de communication entre les chambres en obturant certains passages. Ce mécanisme simple de conservation des chemins en fonction de l'intensité du trafic permettrait aux termites d'optimiser collectivement la structure du réseau de communication au sein de leur nid, de façon décentralisée et sans qu'aucun insecte n'ait besoin d'une information globale pour y parvenir. Les caractéristiques des réseaux obtenus en simulant ce mécanisme sont très similaires à celles des réseaux construits par les termites *(voir l'encadré ci-contre)*.

Pour construire leurs nids, termites et fourmis doivent coordonner leurs actions, sinon il leur serait impossible de réaliser des architectures aux formes parfois si élaborées. Comment ces insectes réalisent-ils de telles prouesses ? Il y a un peu plus d'un siècle, dans son ouvrage *La vie psychique des bêtes*, le naturaliste allemand Ludwig Büchner décrivait les fourmis comme des insectes doués de facultés assez proches de l'intelligence humaine, leur permettant notamment d'entrevoir l'objectif de leurs travaux et de concevoir ensuite un plan d'exécution pour les mettre en œuvre. Selon lui, la complexité des comportements collectifs des sociétés d'insectes trouvait son origine dans les capacités des individus à centraliser et traiter l'information. Ceux-ci décideraient ensuite des actions à entreprendre en se représentant leur environnement



Pour comprendre comment les termites aboutissent à une telle optimisation de leurs réseaux, on étudie l'évolution de graphes modèles en fonction de contraintes inspirées du comportement des termites. Ici, les auteurs ont simulé l'évolution de la structure d'un réseau lorsque les arêtes (galeries) les moins importantes pour la circulation sont progressivement éliminées sans que les liaisons entre l'ensemble des nœuds (chambres) soient perdues (*f*). L'importance d'une arête est donnée par sa centralité, c'est-à-dire le nombre de plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds du graphe qui passent par l'arête. Dans les réseaux obtenus par ce modèle, les distances entre les nœuds sont courtes, bien qu'un grand nombre d'arêtes aient été éliminées – un schéma similaire à celui observé dans les termitières naturelles.



4. EN CONDITIONS EXPÉRIMENTALES, des groupes de 500 fourmis construisent deux types de structures aux formes distinctes : des ensembles de piliers et de murs régulièrement espacés *(a)* ou de larges plateaux soutenus par un petit nombre de piliers *(b)*. Ces structures sont remodelées en permanence par les fourmis ; les ouvrières détruisent certaines parties du nid et reconstruisent de nouvelles structures. Sur la séquence ci-dessus *(c)*, 48 heures se sont écoulées entre la première image (en haut) et la dernière.

ou analyseraient les données des problèmes auxquels ils seraient confrontés.

Toutefois, l'ensemble des études réalisées au cours des 50 dernières années a montré que ni les termites ni les fourmis n'ont une représentation ou une connaissance explicite des structures qu'ils construisent. Les insectes n'utilisent aucun plan prédéfini pour construire leurs nids. Chaque individu n'a en général accès qu'à une information locale sur ce qui se passe dans son environnement. Quant au fonctionnement de ces sociétés, il repose sur un réseau complexe d'interactions qui permet aux insectes d'échanger de l'information et de coordonner leurs activités. Il n'y a donc pas de chef d'orchestre dans ces sociétés.

C'est le zoologiste français Pierre-Paul Grassé qui, à la fin des années 1950, a proposé un mécanisme expliquant comment les insectes coordonnent leurs activités de construction au moyen d'interactions indirectes. En étudiant la reconstruction du nid chez les termites du genre *Bellicositermes*, Grassé a découvert qu'un ouvrier ne contrôle pas directement son activité bâtisseuse, mais que son travail est déclenché et orienté par les structures résultant de son activité antérieure – un mécanisme qu'il nomma stigmergie (du grec *stigma*, piqûre, et *ergon*, travail). Commun à tous les insectes sociaux – termites, fourmis, guêpes, abeilles –, ce mécanisme se met en place grâce aux traces laissées sur le sol par un insecte lorsqu'il se déplace : pistes de phéromones et ébauches de construction résultant de son activité passée constituent autant de sources de stimulation qui déclencheront en retour des comportements spécifiques chez lui et les autres insectes de la colonie.

L'activité de ces insectes transforme alors le stimulus qui a déclenché leur comportement en un nouveau stimulus qui déclenchera de nouveaux comportements. Lorsque le comportement de l'insecte conduit à renforcer l'intensité du stimulus déclencheur, une rétroaction positive se met en place. Ce processus conduit à une coordination des activités des insectes tout en donnant l'illusion que la colonie suit dans son ensemble un plan prédéfini.

Des structures remodelées en permanence

Ainsi, pour comprendre la dynamique de la construction d'un nid, il nous fallait, d'une part, identifier les stimulus déclenchant une activité bâtisseuse et, d'autre part, caractériser la réponse comportementale des insectes. C'est ce que nous avons entrepris en étudiant la construction du nid chez la fourmi *Lasius niger*. Cette espèce présente un double avantage : elle s'élève et s'étudie facilement en laboratoire, et elle construit des nids en terre argileuse dont la structure est assez proche de celle des nids d'autres espèces de termites et de fourmis. Notre hypothèse était que les mécanismes impliqués dans la construction du nid chez les termites et les fourmis étaient assez semblables, de sorte qu'en étudiant *Lasius niger*, il nous serait possible de déduire quelques généralités applicables à d'autres espèces.

Pour mettre en évidence les différents processus intervenant dans la construction du nid, nous avons caractérisé séparément les comportements individuel et collectif des insectes, puis nous avons relié les deux échelles de phénomènes au moyen d'un modèle mathématique. Nous avons tout d'abord étudié la construction du nid à l'échelle « macroscopique » et caractérisé les structures spatiales construites par les fourmis. Pour cela, nous avons introduit un groupe de 500 fourmis dans un dispositif simple constitué d'une boîte de Pétri contenant une mince couche d'un mélange de sable et d'argile humidifié *(voir la figure 4)*. Le dispositif était éclairé en permanence, ce qui avait pour effet de stimuler fortement l'activité bâtisseuse des fourmis. Celles-ci entreprirent rapidement la construction d'un abri pour se protéger. La quantité de sable disponible était limitée de façon à n'observer que les premières étapes de construction. Dans ces

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

tains cas, les fourmis bâtirent des piliers et des murs régulièrement espacés. Dans d'autres cas, elles bâtirent des structures en forme de plateaux qui se développaient généralement à partir des bords internes du dispositif et qui reposaient sur de rares piliers. Par ailleurs, ces structures n'étaient pas figées : elles étaient en permanence remodelées par les fourmis. Ainsi, il n'était pas rare d'observer une fourmi en train de détruire le travail qu'une autre avait méticuleusement réalisé quelques minutes auparavant.

Nous avons ensuite étudié les comportements de construction à l'échelle individuelle. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs séries d'expériences afin de caractériser avec précision les comportements de prise et de dépôt de matériel de construction, mais aussi le transport des boulettes d'argile. Deux formes principales de rétroaction entre les fourmis et leurs structures, résultant de leur activité, sont apparues *(voir l'encadré ci-dessous)*. Tout d'abord, les fourmis déposent préférentiellement du matériel de construction dans les zones au niveau desquelles d'autres dépôts ont déjà été réalisés. Cette rétroaction positive est déclenchée par une phéromone que les fourmis ajoutent au matériel de construction : le dépôt de boulettes d'argile en un point de l'espace incite les fourmis à déposer d'autres boulettes au même endroit, et cette tendance est d'autant plus forte que la quantité d'argile déjà déposée est importante. En revanche, la phéromone n'a aucun effet sur le comportement de prise de matériel : quelle que soit l'intensité du marquage, les fourmis continuent à prélever des boulettes à un rythme constant.

L'accumulation de boulettes d'argile au même endroit conduit à la formation d'un pilier. Une seconde forme de rétroaction intervient lorsque les piliers atteignent une hauteur comprise entre quatre et

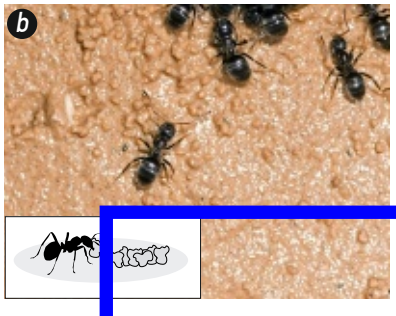
© C. Jost, CRCA, UPS, Toulouse

3. DEUX TERMITES de l'espèce *Cornitermes cumulans* déposent, sur des parois de leur terrilière, des boulettes confectionnées à partir de terre mélangée à leurs propres excréments.

LE COMPORTEMENT DE CONSTRUCTION CHEZ LA FOURMI *LASIUS NIGER*

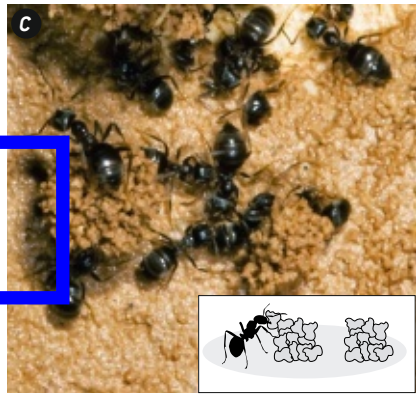
Bien que l'architecture d'un nid de fourmis *Lasius niger* soit structurée, chaque ouvrier bâtisseur n'a accès qu'à des informations locales. L'insecte prélève continuellement des boulettes d'argile *(a)* pour les déposer aux endroits où elles abondent déjà *(b)*. Il perçoit ces endroits grâce aux phéromones mêlées aux boulettes par les fourmis lorsqu'elles les préparent. Des piliers apparaissent ainsi *(c)*, qui deviennent des chapiteaux au-delà d'une certaine hauteur *(d)*. La coordination des activités émerge à partir de ces comportements individuels et des rétroactions produites par les structures édifiées.

◀ La fourmi prélève une boulette d'argile parmi le matériel disponible, c'est-à-dire là où d'autres fourmis en ont déposé. En la fabriquant avec sa salive, elle l'imbibe de phéromone.



▲ Attirée, dans son rayon de perception (cinq millimètres autour de sa tête), par les phéromones contenues dans des boulettes déjà déposées, la fourmi place sa boulette d'argile là où leur concentration est la plus forte.

▼ Les dépôts s'amplifient à certains endroits, qui deviennent des piliers.



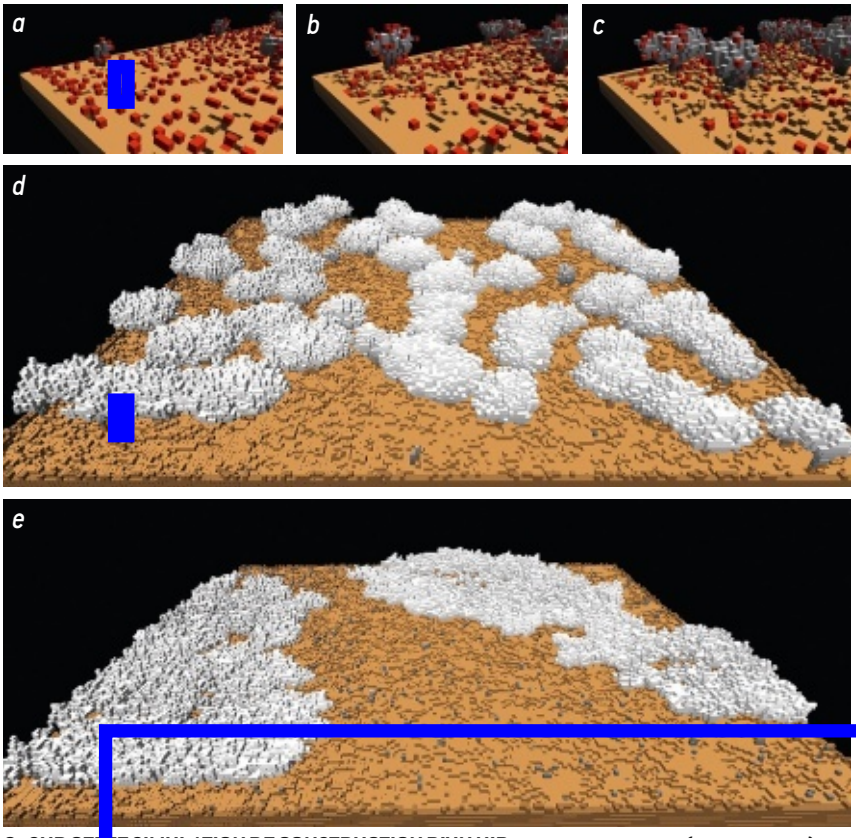
▲ Lorsque les piliers atteignent une hauteur minimale de quatre millimètres, les fourmis commencent à déposer des boulettes latéralement. Elles construisent ainsi peu à peu des chapiteaux.

dix millimètres, ce qui correspond environ à la longueur du corps d'une fourmi. Les ouvrières construisent alors des extensions latérales qui constituent par la suite des « chapiteaux » de forme globulaire. Le corps des fourmis joue le rôle d'un gabarit qui détermine la hauteur à partir de laquelle elles cessent de construire verticalement et commencent à déposer des boulettes latéralement sur les piliers ou les murs qu'elles rencontrent.

Ces trois règles de comportement – fabrication régulière de boulettes, empilement là où il y en a déjà le plus, construction latérale au-delà d'une certaine hauteur – sont-elles suffisantes pour reproduire les caractéristiques des structures réalisées par les fourmis dans les expériences ? Pour relier les deux échelles de phénomènes, nous avons construit un modèle informatique (dit individu-centré) dans lequel ont été codées l'ensemble des règles de comportement impliquées dans la construction, ainsi que les caractéristiques du déplacement des fourmis.

Dans le modèle, élaboré avec Anaïs Khuong et Jacques Gautrais, du Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse, nous avons représenté les boulettes de terre utilisées dans la construction du nid. Les fourmis sont, quant à elles, figurées par des agents dont le déplacement est contraint par les structures qu'ils construisent, de sorte qu'ils restent en contact avec la surface de l'architecture. Par ailleurs, ces agents n'ont qu'une perception locale de leur environnement et leurs comportements de prise et de dépôt de matériel de construction ont été calibrés à partir des données expérimentales.

Les simulations ont montré une forte similarité entre les formes construites dans les expériences et celles produites par le modèle pour des conditions initiales similaires. L'évolution du nombre de piliers construits au cours du temps ainsi que la distance moyenne entre deux piliers ont été reproduites fidèlement. En outre, l'analyse du modèle a mis en évidence le rôle clef de la phéromone ajoutée par les fourmis au matériel de construction dans la dynamique de croissance et les formes résultantes. Dans le modèle, l'augmentation du taux d'évaporation de la phéromone conduit à une importante diminution du nombre de piliers construits, de même qu'à l'élargissement des chapiteaux sur les piliers *(voir la figure 6)*.



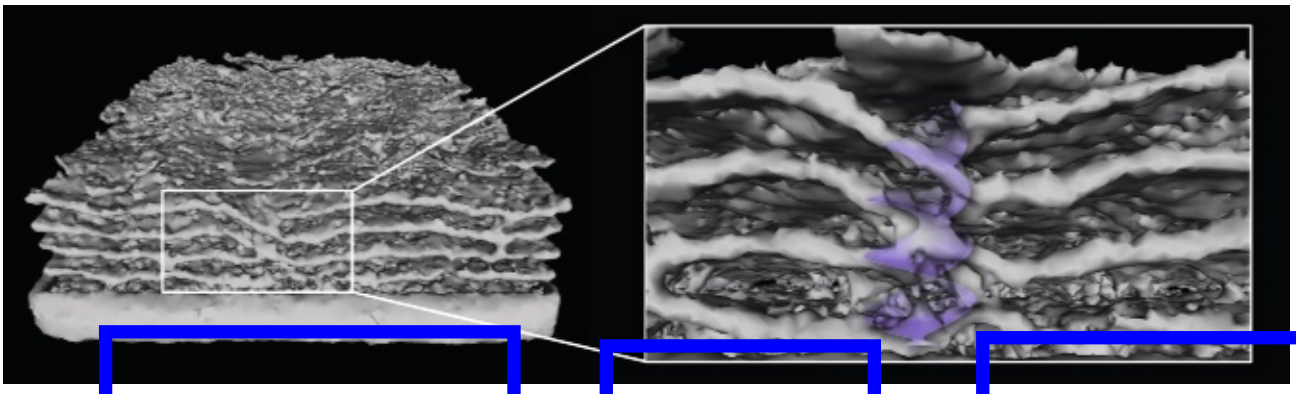
6. SUR CETTE SIMULATION DE CONSTRUCTION D'UN NID, des agents-fourmis *(cubes rouges)* prélèvent et déposent des boulettes de terre *(en gris)* en suivant les règles de comportement caractérisées par les observations. Une zone où la densité de boulettes est assez élevée devient un germe à partir duquel les agents-fourmis construisent un pilier, grâce à la rétroaction positive produite par la phéromone qui stimule le dépôt *(a)*. Au-delà d'une certaine taille de pilier, les agents-fourmis réalisent des dépôts en hauteur, ce qui augmente vite la surface sur laquelle de nouvelles boulettes peuvent être déposées et conduit à la formation de chapiteaux globulaires *(b)*. Les chapiteaux proches fusionnent en créant un passage voûté *(c)*. La forme de l'architecture dépend de la durée de vie de la phéromone déposée par les agents-fourmis au matériel de construction : si elle est élevée, piliers et murs sont régulièrement espacés *(d)* ; si elle est courte, de larges plateaux se forment *(e)*.

Une architecture contrôlée par les phéromones

De façon générale, l'ensemble des structures obtenues en simulation lorsque l'on fait varier les paramètres – durée de vie de la phéromone, terre disponible – reflète assez bien la diversité des formes observées dans les expériences : de larges plateaux ou un grand nombre de piliers assez étroits régulièrement espacés. Au vu des résultats du modèle, cette diversité de formes trouverait son origine dans la variation de la durée de vie de la phéromone. Or celle-ci est influencée par les conditions de température et d'humidité. Grâce à ce mécanisme, lorsque la température augmente, les fourmis construisent des abris dont la forme est beaucoup plus appropriée pour les protéger, et cela sans que cette adaptation ne soit codée dans leurs règles de comportement. Plus il fait chaud, plus la phéromone s'évapore vite, et la compétition entre les piliers devient intense pour attirer les fourmis porteuses de boulettes, ce qui à la fin réduit fortement le nombre de piliers capables d'émerger et de persister. Autre conséquence de l'évaporation de la phéromone, sur les quelques piliers restants, les chapiteaux construits sont élargis et offrent ainsi une meilleure couverture. Par sa structure, le nid ainsi bâti constitue un abri qui limite la dessiccation et conserve un niveau d'humidité favorable aux fourmis.

Nous avons ensuite exploré plus avant les propriétés du modèle en étudiant les structures obtenues avec un volume initial de matériel de construction beaucoup plus important. Dans ces nouvelles conditions, la fusion progressive des chapiteaux sur les piliers conduit à la formation d'une cloison horizontale. De nouveaux piliers

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012



7. SIMULATION D'UNE STRUCTURE OBTENUE avec suffisamment de matériel de construction. On obtient alors une série de plateaux régulièrement espacés et parfois connectés par des rampes hélicoïdales *(en violet)*. Une telle structure est similaire à celles observées dans certaines termitières et fourmilières.

sont ensuite construits sur celle-ci, bientôt surplombés d'une autre cloison. La construction se poursuit jusqu'à épuisement du matériel. La structure résultante est alors constituée d'une série de plateaux espacés de façon à peu près régulière. Ces derniers sont reliés en plusieurs endroits par une continuité entre le plancher d'un niveau et celui d'un autre niveau *(voir la figure 7)*.

Des rampes spiralées entre les étages

En étudiant ces zones de connexion, nous avons constaté avec surprise que certaines avaient une forme hélicoïdale que nous avions déjà observée dans les nids réels, lors de l'exploration de leur reconstitution tridimensionnelle. Comment de telles structures pouvaient-elles apparaître au cours de la simulation ? En analysant la dynamique de construction de notre modèle, nous avons tout d'abord observé que si la forme globale du nid demeurait identique au cours du temps, la structure était en permanence détruite et reconstruite. Ce remodelage permanent est lié au fait que les agents-fourmis du modèle détruisent ce qu'ils ont construit auparavant. Comme le font les fourmis réelles, ils prélèvent du matériel sur la surface supérieure des cloisons, qu'ils déposent ensuite sur leur face inférieure. Cela entraîne le déplacement progressif de l'ensemble des niveaux du sommet jusqu'à la base de la structure.

Nous avons constaté qu'au fil des remodelages successifs, certaines cloisons horizontales nées de la fusion progressive des chapiteaux entraient en collision avec d'autres situées au niveau inférieur. Les rampes spiralées sont construites dans les zones où ces défauts apparaissent : elles établissent la jonction des cloisons entre deux étages contigus. Ces résultats montrent qu'une grande partie de la complexité des nids

LES AUTEURS

Guy THERAULAZ, directeur de recherche au CNRS, travaille au Centre de [illegible] sur la cognition animale de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse.

Andrea PERNA est chercheur postdoctoral à l'Université d'Uppsala, en Suède.

Pascale KUNTZ, professeur à l'École polytechnique de l'Université de Nantes, travaille au Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique.

À ÉCOUTER

Jeudi 4 octobre, **Guy Theraulaz** viendra sur les prouesses techniques des termites dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h. www.franceculture.com

BIBLIOGRAPHIE

A. Perna *et al.*, **From local growth to global optimization in insect built networks**, dans P. Lio et D. Verma (dir.), **Biologically Inspired Networking and Sensing : Algorithms and Architectures**, IGI Global, pp. 132-144, 2011.

A. Perna *et al.*, **The structure of gallery networks in the nests of termite *Cubitermes spp.* revealed by X-ray tomography**, *Naturwissenschaften*, vol. 95, pp. 877-884, 2008.

A. Perna *et al.*, **Topological efficiency in three-dimensional gallery networks of termite nests**, *Physica A*, vol. 387, pp. 6235-6244, 2008.

construits par les fourmis, et sans doute aussi les termites, pourrait résulter d'un décalage spatial et temporel dans la croissance des différentes régions du nid.

Objets de fascination et d'interrogation depuis plus d'un siècle, les rampes hélicoïdales sont aujourd'hui produites par notre modèle. Cela indique qu'elles ne sont pas codées dans le comportement des agents, mais résultent de la dynamique engendrée par les règles de comportement des agents et des contraintes physiques imposées par les structures sur leurs déplacements. Ces résultats illustrent l'une des plus importantes propriétés des processus d'auto-organisation chez les insectes sociaux : l'émergence de propriétés nouvelles à l'échelle collective à partir de comportements individuels et d'interactions simples – propriétés qui seront bénéfiques à tous les individus de la colonie.

Ces processus d'auto-organisation permettent donc une réelle économie de codage des mécanismes qui, au niveau individuel, conditionnent l'émergence de ces propriétés. Cependant, de nombreuses questions restent encore ouvertes : quels sont les autres processus impliqués dans la construction des nids ? Comment l'architecture du nid intervient-elle dans la thermorégulation et les échanges gazeux ? Comment s'organise la vie dans de tels nids ? Ces questions intéressent les biologistes, mais aussi les architectes et les urbanistes qui, aujourd'hui, s'inspirent des principes de construction des insectes sociaux pour concevoir de nouvelles formes d'architectures. ■

Voyage au centre des termitières et des fourmilières

Guy Theraulaz, Fabien Picarougne et Christian Jost

Grâce à la tomographie à rayons X et à une reconstitution informatique, des éthologues visitent virtuellement les galeries de ces nids à l'architecture remarquable. Voici les premières images de leur voyage. À vos lunettes 3D !

Les nids construits par les termites sont parmi les structures les plus élaborées et les plus complexes du monde animal. Ces architectures, tout autant que leurs bâtisseurs, sont difficiles à observer. Les constructions s'opèrent dans l'obscurité la plus totale et l'intérieur des nids n'est accessible qu'en endommageant leur structure externe. Aujourd'hui, les outils d'imagerie médicale permettent d'analyser et de voyager au cœur de ces édifices sans les détruire.

Pour étudier l'architecture des nids, on utilise la tomographie à rayons X. Les rayons « découpent » la termitière en minces tranches, au sein desquelles la structure interne de la termitière est repérée par les différences de densité. On obtient une série de coupes virtuelles des nids dont l'épaisseur est de l'ordre d'un demi-millimètre. À partir de ces coupes, on reconstruit par ordinateur la structure tridimensionnelle des nids, que l'on utilise pour quantifier leurs caractéristiques spatiales.

La structure interne des nids est constituée de piliers et de cloisons en terre qui forment un dédale complexe de chambres interconnectées par des tunnels. Pour l'étudier, le Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique a développé un logiciel qui permet de visualiser en temps réel les données issues de la tomographie et de reconstruire la structure tridimensionnelle associée. Ces deux modes de représentation sont complémentaires : avec l'un, on perçoit la forme générale du nid en ajustant la transparence des murs et, avec l'autre, on précise la structure interne du nid grâce à des détails très fins.

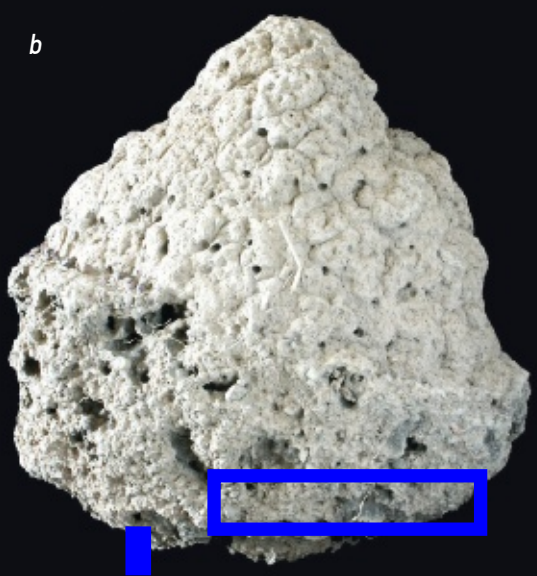
Le logiciel a été conçu pour permettre une navigation interactive à l'intérieur des structures visualisées. Grâce à une souris 3D ou à des capteurs inertiels, le navigateur se déplace librement dans le nid virtuel projeté sur un dôme qui l'entoure. Chaque image est produite en moins de 50 millisecondes. Elle comporte plus de trois millions de facettes (éléments de surface) à afficher.

La perception de la profondeur est facilitée par la production d'images stéréoscopiques selon différents modes : l'anaglyphe, utilisé ici, où chaque œil reçoit une image différente grâce à des lunettes à filtres colorés (*détacher les lunettes page 28*) ou par projection avec des lunettes actives ou passives. Voici quelques-unes des images en relief produites à partir des nids de cinq espèces de termites et d'une de fourmis.

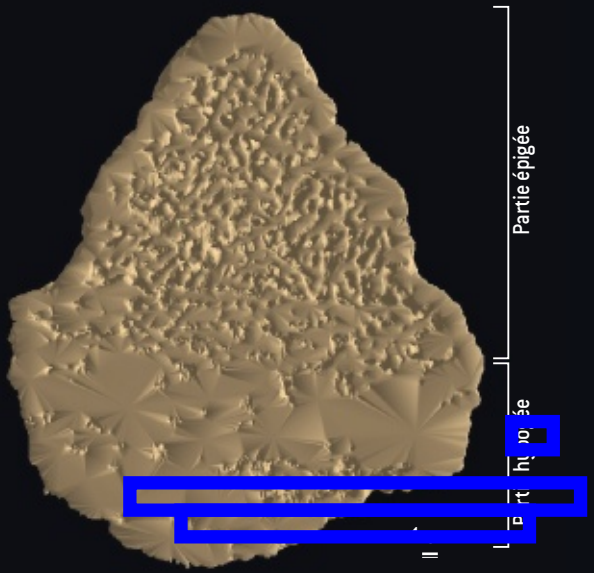
1 Les termites *Trinervitermes geminatus (a)* vivent dans les savanes au Nord du bloc forestier africain, du Sénégal à l'Ouganda. Partiellement enterrés, leurs nids sont constitués de quatre à cinq unités *(b)* – des calies – interconnectées par des tunnels souterrains. On trouve souvent 40 à 50 calies par hectare, parfois plus de 500. La terre du nid est enrichie en argile que les termites prélèvent parfois à plusieurs mètres de profondeur. La forme de la partie hypogée (souterraine) du nid, fruit du creusement et du renforcement des galeries, est influencée par la structure du sol. La partie épigée (émergée) est en revanche bâtie de toutes pièces par les termites. Sa structure lacunaire, constituée de piliers et de lamelles de terre, ne comporte pas de passages rétrécis (galeries), ce qui autorise un déplacement de masse des termites *(c)*.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

b

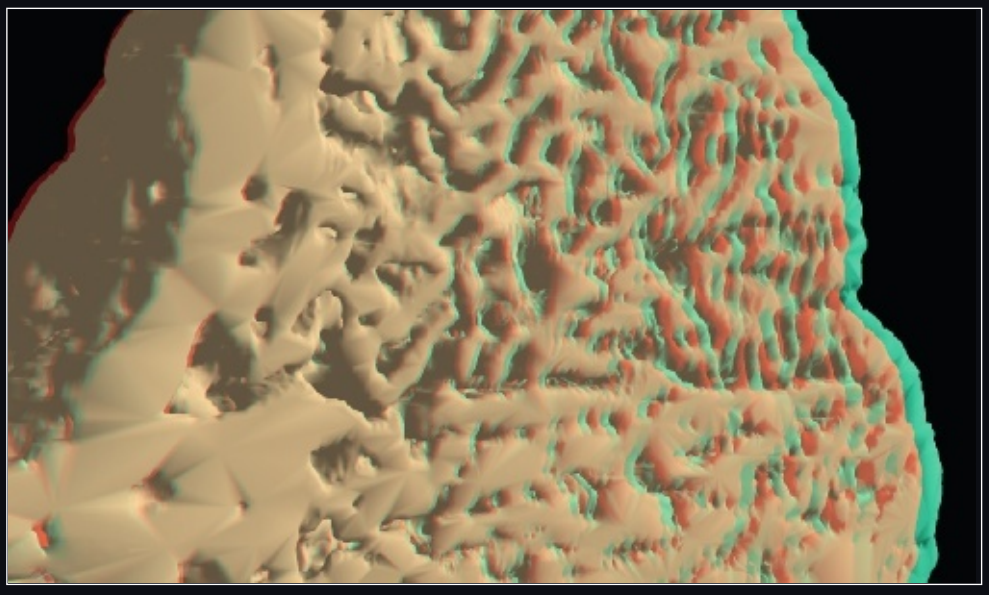


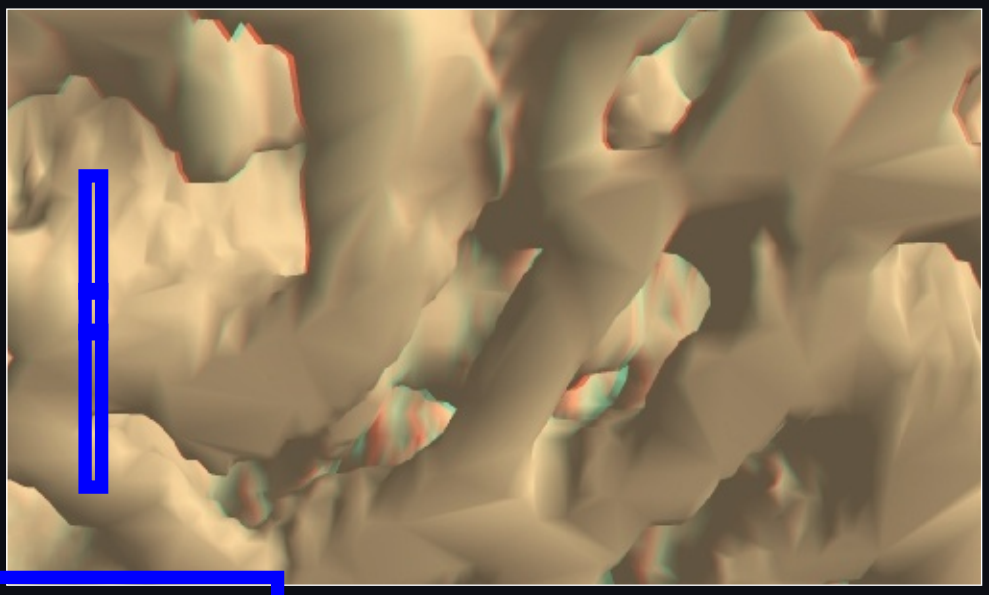
Une unité (calie) d'un nid réel après son extraction du sol.



Une coupe *(ci-dessus)* et deux zooms *(ci-dessous)* de la reconstitution virtuelle de la calie.

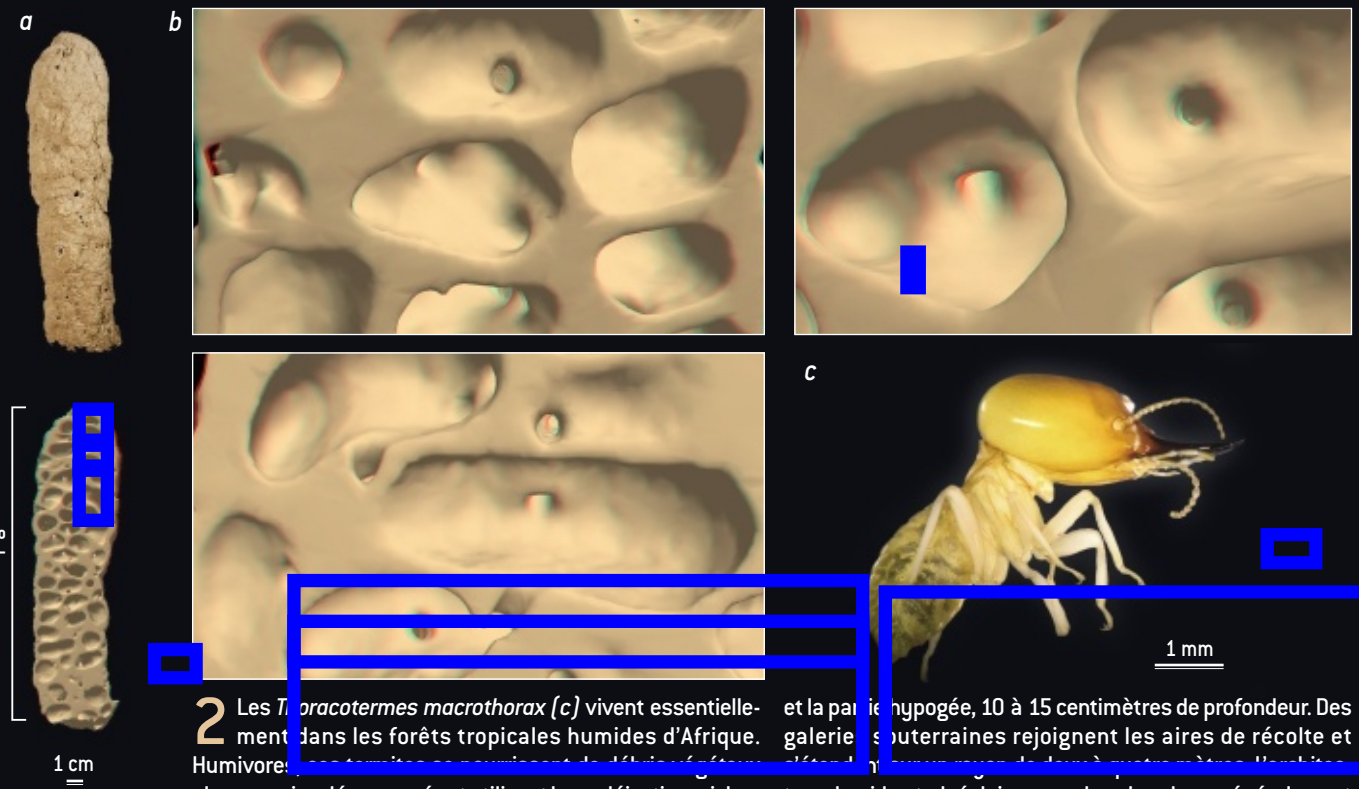
c



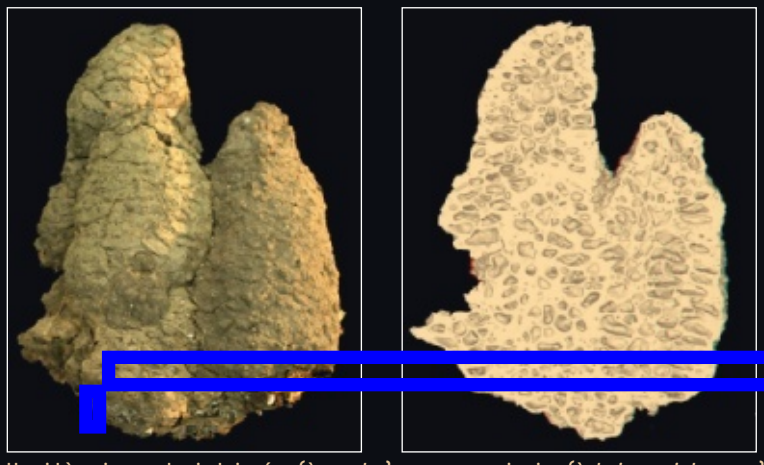


Sauf mention contraire, toutes les figures sont des auteurs

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

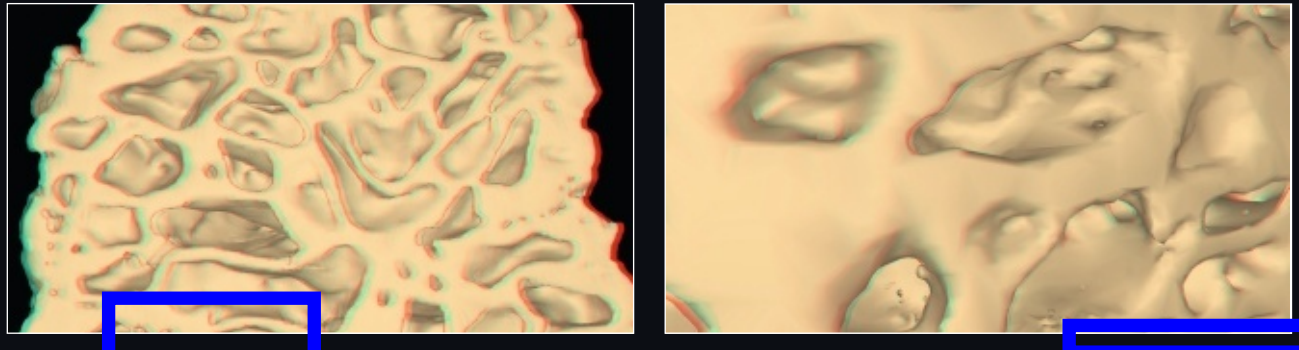


2 Les *Trinervitermes macrothorax (c)* vivent essentiellement dans les forêts tropicales humides d'Afrique. Humivores, ces termites se nourrissent de débris végétaux plus ou moins décomposés et utilisent leurs déjections riches en matière organique comme ciment pour construire leur nid *(a)*. La partie épigée du nid peut atteindre 80 centimètres et la partie hypogée, 10 à 15 centimètres de profondeur. Des galeries souterraines rejoignent les aires de récolte et s'étendent parfois jusqu'à quatre mètres. L'architecture du nid est alvéolaire avec des chambres généralement plus larges que hautes, connectées par des tunnels de petit diamètre ne permettant le passage que d'un seul termite *(b)*.



Un nid à trois gourdes imbriquées *(à gauche)* et sa reconstitution *(à droite et ci-dessous)*.

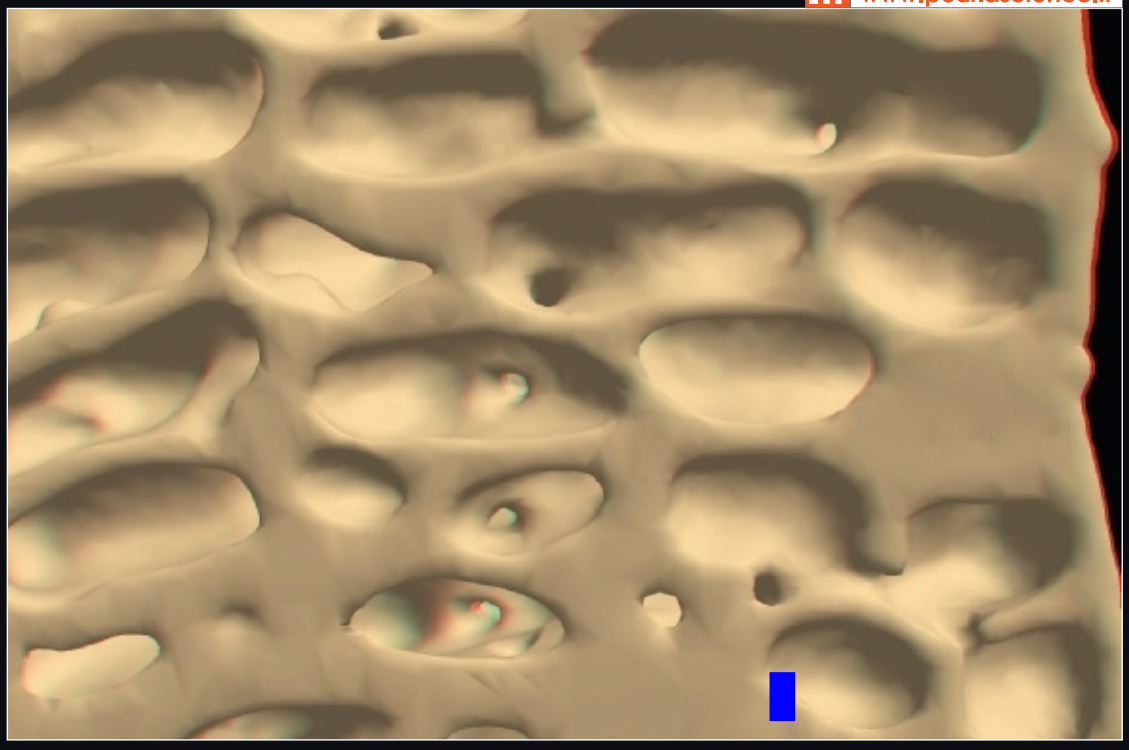
3 Rencontrés dans les savanes arbustives d'Afrique, les termites *Procubitermes sjoestedti* construisent des nids épigés riches en excréments *(a)*. Ces termites jouent un rôle important dans l'ameublissement des sols, la dégradation de la matière organique et le mélange des strates en transportant de la terre des couches profondes vers la surface. Construits entre les contreforts de grands arbres, les nids sont souvent plaqués contre l'écorce. Ils sont constitués de constructions en forme de gourde imbriquées qui communiquent à leurs extrémités. L'intérieur des gourdes est constitué d'alvéoles de forme et de taille variables reliées par de petites galeries *(b)*. Ces ensembles de gourdes sont connectés au réseau de galeries souterraines par une ou plusieurs grandes galeries.



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

À retrouver en vidéo sur .fr www.pourlascience.fr

a

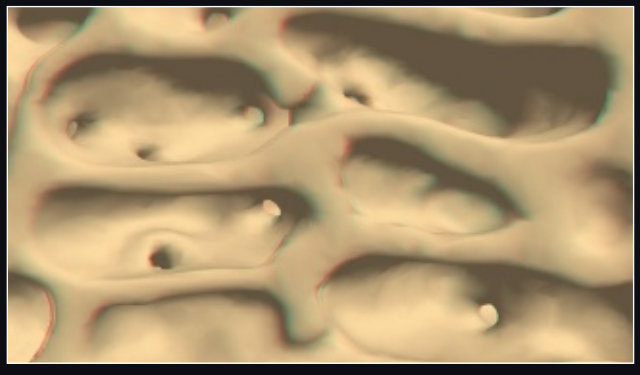


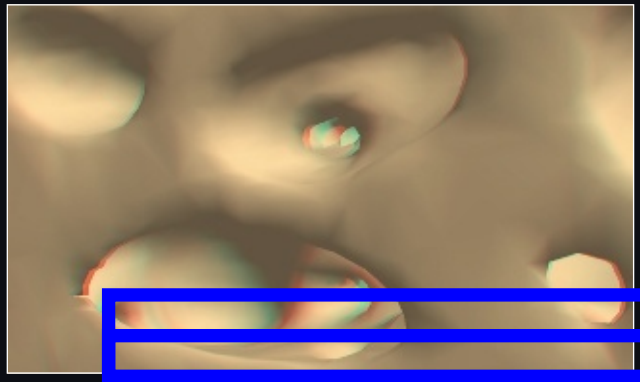
b

Partie épigée d'un nid constitué d'une colonne et d'un chapeau

1 cm

Reconstitution virtuelle du nid et de son réseau interne





c

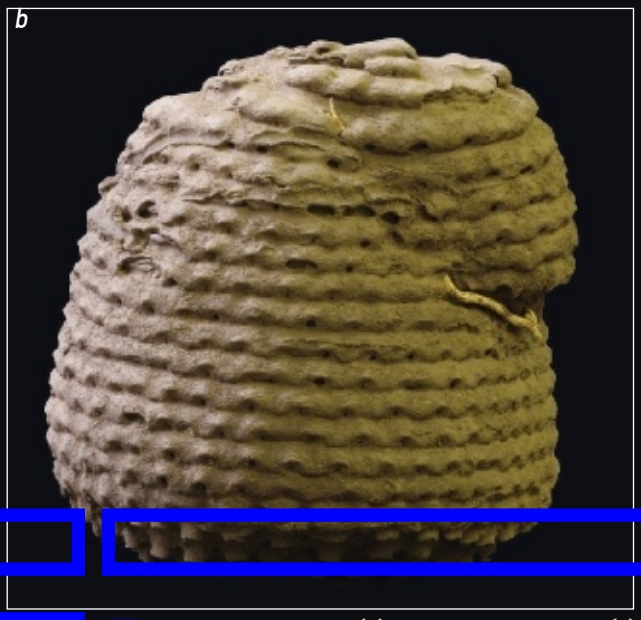
Un termite soldat *Cubitermes* défend un tunnel de communication pendant que des ouvriers évacuent les larves après une forte perturbation.

Guy Apollens

4 Les termites du genre *Cubitermes (c)* sont africains. Parmi eux, 60 espèces vivent dans une zone qui s'étend de la forêt équatoriale à la savane du Sud Soudan. Humivores, ils jouent un rôle important dans certains écosystèmes. L'architecture des nids est constituée d'un nombre variable de colonnes jointives qui, selon les espèces, peuvent être recouvertes d'un chapeau *(b)*. À l'intérieur du nid, des chambres de forme ovoïde sont reliées par des tunnels dont le diamètre est légèrement supérieur à celui d'un seul termite *(a)* : un unique soldat suffit ainsi pour contrôler l'accès à certaines zones du nid. L'ensemble constitue un réseau de nœuds (chambres) et d'arêtes (tunnels). La croissance du nid est discontinue : l'activité de construction s'effectue au cours de phases assez courtes (quelques jours) entrecoupées de phases de repos plus longues (parfois plusieurs mois). Une colonie de *Cubitermes* peut vivre une dizaine d'années sur un même site. Dans la savane, certains sites comptent jusqu'à 2 000 nids par hectare.

a

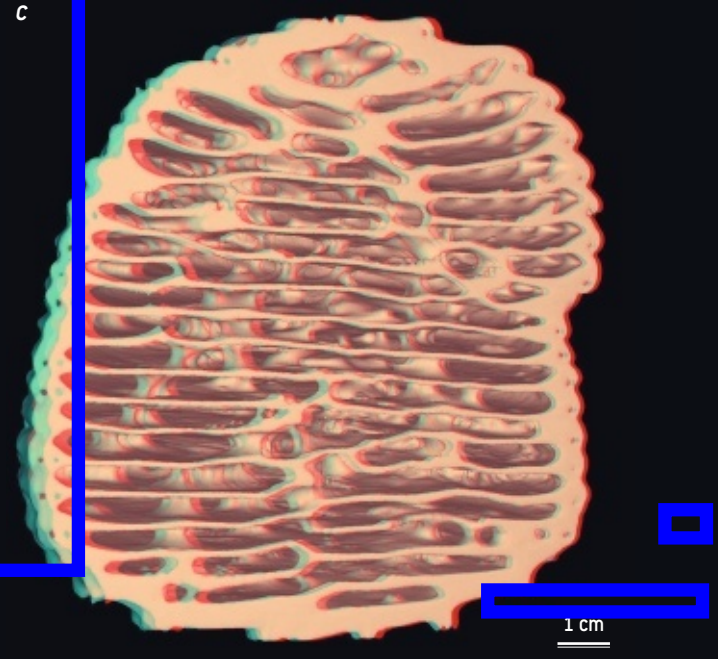
b



Trois termit[illegible] du genre *Apicotermes*. L'un est un termite soldat, chargé de la défense du [illegible] une calie[illegible] d'un[illegible] après son extraction du sol *(b)* et sa reconstitution virtuelle *(c)* associ[illegible] gné[illegible] de quelques zooms sur les rampes hélicoïdales (*d* et *e*).

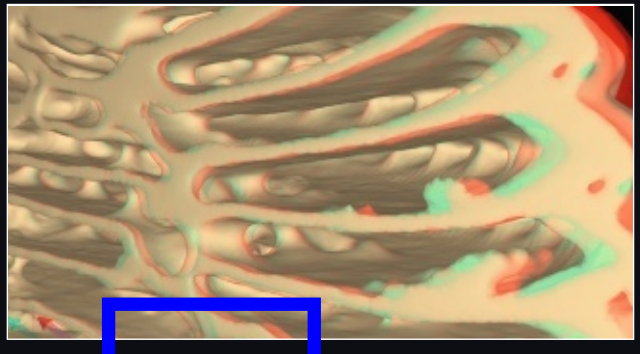
5 Les t[illegible]mites du genre *Apicotermes (a)* vivent principalement dans [illegible]es forêts de l'Afrique centrale et de l'Afrique de l'Ouest et parfois [illegible]ans les savanes avoisinantes. Leur vie est exclusivement sout[illegible]rraine, ce qui rend leur étude particulièrement difficile. Construit[illegible] partir d'excréments, le nid, entièrement hypogé, est constitué [illegible]e plusieurs unités (calies) de forme ovoïde, semblables à cel[illegible] représentée ici *(b)*. Distantes de moins d'un mètre, ces calies [illegible]ont reliées par des tunnels. Chaque calie n'est pas directement en [illegible]ontact avec le sol. Elle est entourée d'un espace, nommé paraécie, [illegible]ui, selon l'espèce, reste vide ou est rempli de sable. L'intérieur de [illegible]a calie est constitué d'une série de chambres séparées par de min[illegible]es cloisons horizontales et régulièrement espacées *(c)*. Le déplac[illegible]ment entre les chambres se fait par l'intermédiaire de rampes in[illegible]inées ou hélicoïdales qui relient plusieurs étages *(d et e)*, sans toute[illegible]ois traverser le nid dans son ensemble. Chaque étage compte pl[illegible]sieurs rampes qui constituent autant de passages entre deux chan[illegible]bres adjacentes. Des canaux circulaires parcourent en outre la p[illegible]roi externe de la calie au niveau des différents étages ; ils présen[illegible]nt des ouvertures étroites vers l'intérieur et l'extérieur du nid. Ch[illegible] pour permettre le passage des ouvriers termites. Cette circuiterie complexe interviendrait dans la régulation des niveaux d'oxygène et de dio[illegible]de de carbone.

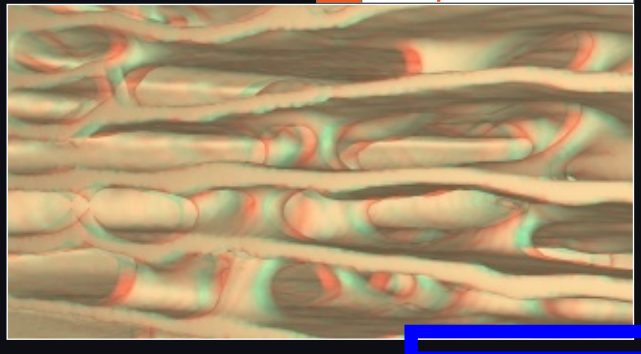
c



.fr À retrouver en vidéo sur www.pourlascience.fr

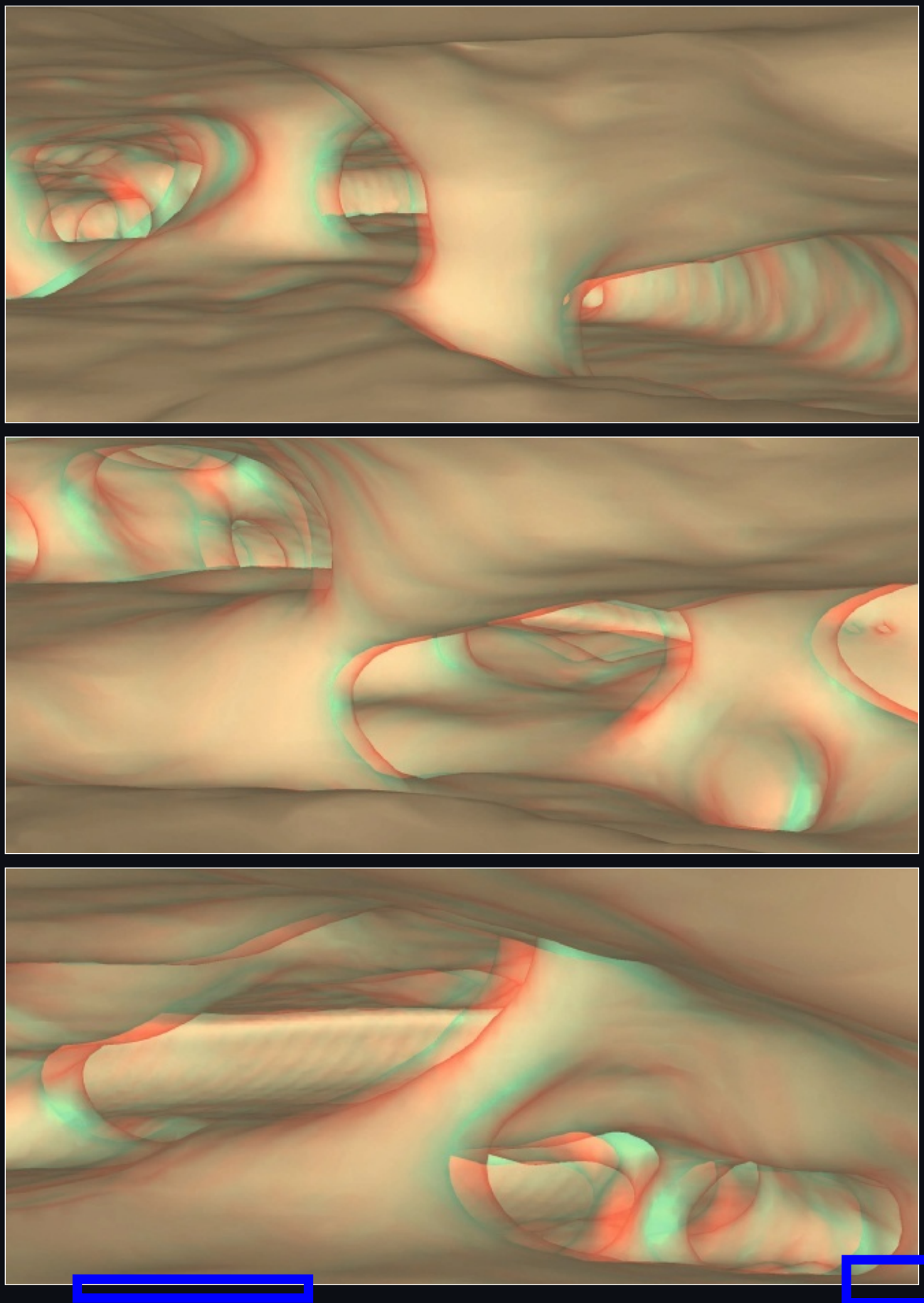
d





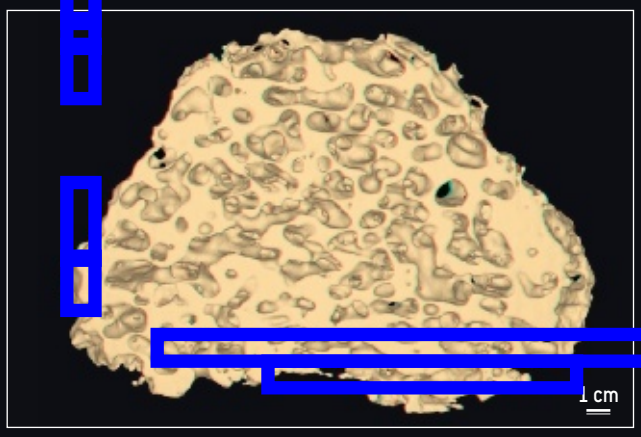
© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

e



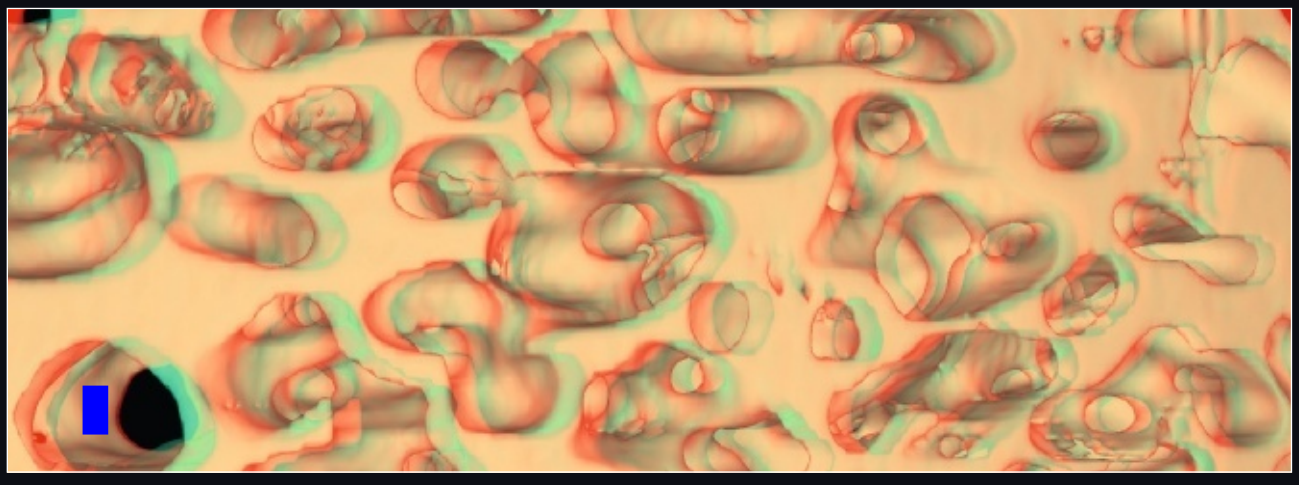
a

Le nid après son extraction du sol.

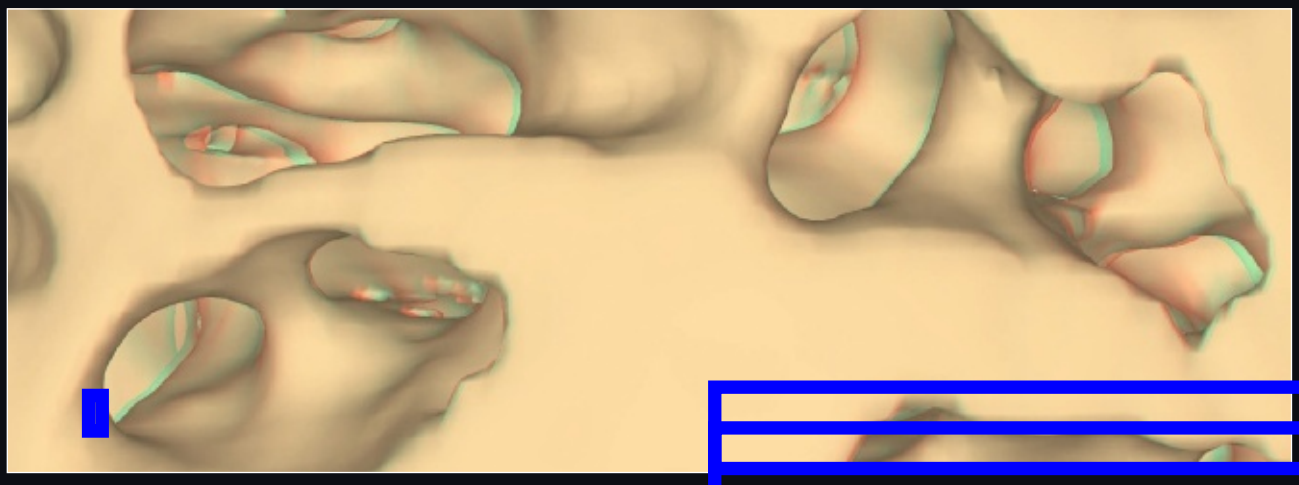


Reconstitution du nid. Ci-dessous et ci-contre, divers zooms de la partie épigée sont présentés.

b



c

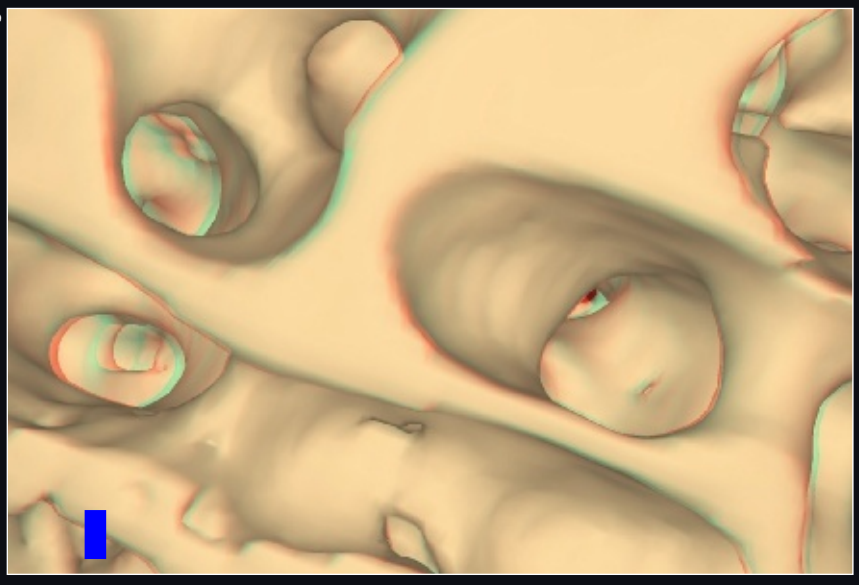


d

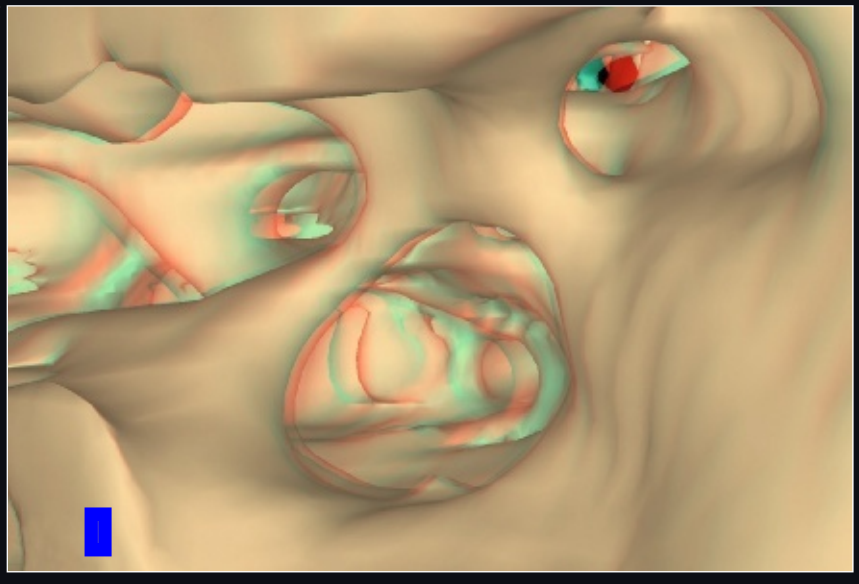
6 *Lasius niger (d)* est une espèce de fourmi commune en Europe et présente en Asie et en Amérique du Nord. Les colonies n'ont qu'une seule reine et sont constituées de 5 000 à 15 000 ouvrières de trois à cinq millimètres. Omnivore, l'espèce se nourrit d'insectes, de graines, de nectar et exploite des colonies de pucerons en récoltant leur miellat. Son nid *(a)* comporte une partie hypogée, composée de chambres creusées dans le sol et reliées par un réseau de galeries, et un dôme épigé en terre constitué de nombreuses [illegible] taille variable, ces chambres s'organisent selon des plans parallèles et superposés *(e)*. Leurs cloisons sont parfois réduites à de simples arches créant des zones de jonction complexes [illegible]

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

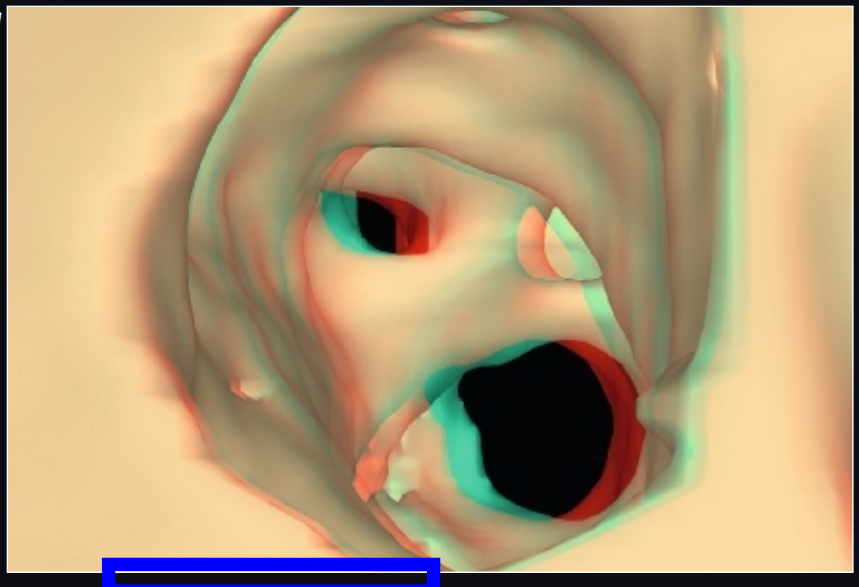
e



f



g



■ LES AUTEURS

Guy THERAULAZ dirige l'équipe Réseaux d'[illegible] complexes dans les sociétés animales au Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse.

Fabien PICAROUGNE, maître de conférences [illegible] de l'Université de Nantes, travaille au Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique.

Christian JOST, maître de conférences à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, travaille au Centre de recherches sur la cognition animale.

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Hansell, **Animal Architecture**, Oxford University Press, 2005.

J. S. Turner, **The Extended Organism : The Physiology of Animal-Built Structures**, Harvard University Press, 2002.

P.-P. Grassé, **Termitologia**, tome 2, Masson, 1984.

Ces nids et des vidéos de navigation virtuelle sont visibles sur le site du projet : **www.mesomorph.org**

Ce portfolio a été réalisé avec le concours de Stéphane Douady, Jacques Gautrais, Anaïs Khuong, Pascale Kuntz, Andrea Perna, Ricard Solé et Sergi Valverde. L'analyse de la structure tridimensionnelle des nids construits par les termites et les fourmis ainsi que l'étude des processus impliqués dans leur morphogenèse ont été réalisées dans le cadre du projet MESOMORPH soutenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Ce projet, dirigé par Guy Theraulaz, a impliqué quatre laboratoires : le Centre de recherches sur la cognition animale à Toulouse, le Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique, le Laboratoire matière et systèmes complexes à l'Université Paris 7 et le Laboratoire des systèmes complexes de Barcelone.

Ce cahier a été réalisé grâce au soutien de l'ANR, de la délégation Midi-Pyrénées du CNRS, de l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, du Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique, de la Fédération de recherche AtlanSTIC, de l'École polytechnique et de la cellule iRéalité de l'Université de Nantes et de la Mairie de Toulouse, dans le cadre de la Novela, festival des savoirs partagés, qui se tiendra du 5 au 21 octobre 2012 à Toulouse.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Archéologie

Les mégalithes

Les mégalithes des hautes terres de Sumatra, que l'on croyait néolithiques comme ceux d'Europe, témoignent en fait des intenses échanges entre les tribus de la forêt et les royaumes bouddhiques du Moyen Âge indonésien.

Dominik Bonatz

1. CE MÉGALITHE COUCHÉ DANS LA FORÊT a été érigé dans la région de Kérinci, dans les hautes terres de Sumatra, où de nombreuses autres pierres dressées sont dispersées dans la jungle.

de Sumatra

Heinzpeter Znoj, mit Fre[illegible]en. von Dominik Bonatz

L'ESSENTIEL

- Au VII[e] siècle, l'émergence de royaumes bouddhiques florissants à Sumatra a donné [illegible] importance commerciale à cette île indonésienne.
- Au XIX[e] siècle, l'archéologie coloniale néerlandaise a attribué aux mégalithes des hautes terres forestières de Sumatra la même ancienneté néolithique que les menhirs et dolmens européens.
- Selon les feuilles récentes, c'est le commerce des produits de la forêt avec les royaumes bouddhiques médiévaux qui a poussé les habitants de la forêt à marquer leurs territoires de pierres dressées.

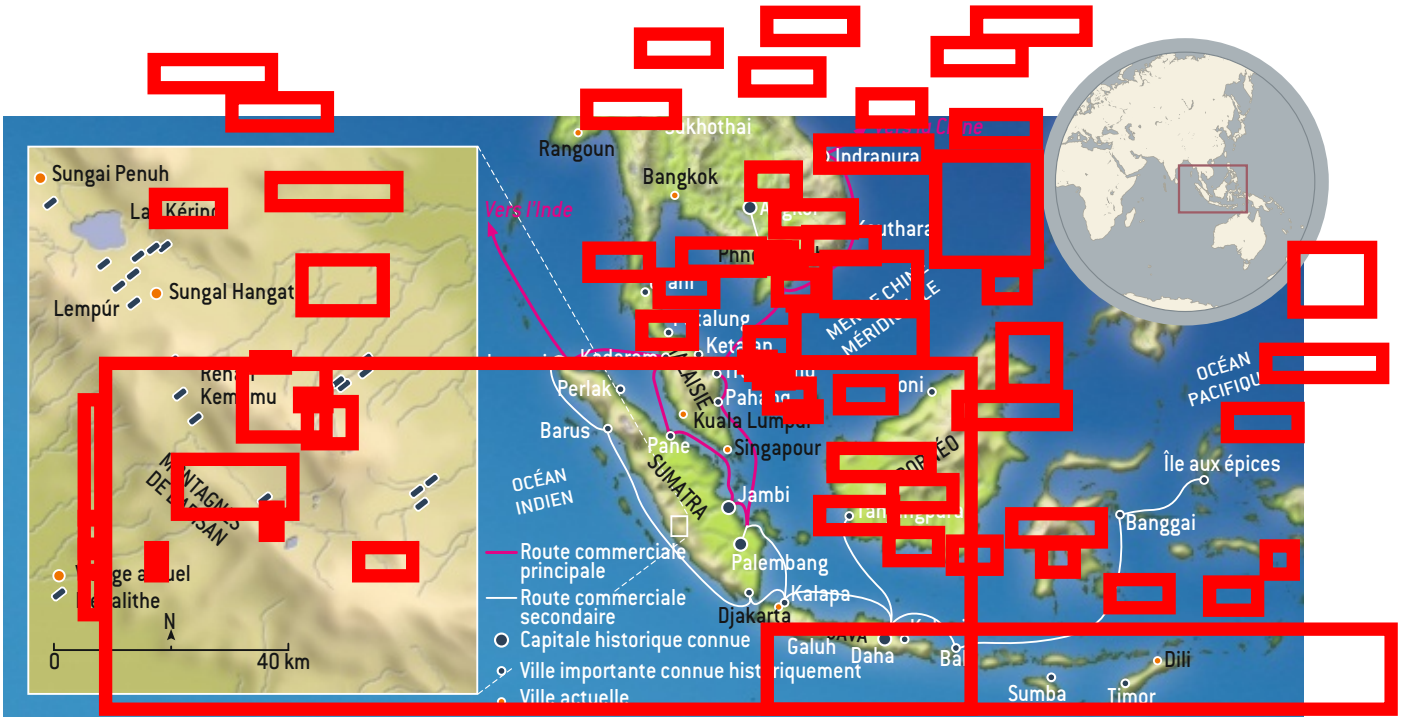
Dans la grande épopée indienne du Ramayana, Sumatra est nommée l'« île de l'or ». Parce qu'elle était riche ? Au VII[e] siècle de notre ère, des princes malais de religion bouddhique bâtirent des villes et des temples dans le royaume de Srivijaya, situé dans les basses terres de l'île. Ce royaume livrait de l'or à l'Inde et aux États du golfe Persique, et ses envoyés apportaient ivoire, cornes de rhinocéros, plumes de calao, miel, bois aromatiques, camphre, benjoin à l'empereur de Chine. D'où provenaient ces richesses ? En grande partie des forêts pluviales des hautes terres de Sumatra, comme on l'expliquera ici, et leur commerce a induit un mégalithisme particulier.

De riches royaumes

Le mégalithisme semble être un très ancien trait culturel de tous les peuples indonésiens. Depuis la Préhistoire, à Sumatra, à Java et partout dans l'archipel, des tribus ont laissé menhirs, dolmens, tables et autels de pierre, pierres couchées et pierres dressées, souvent anthropomorphes ou ornées. Cette activité millénaire sous-tend un culte des ancêtres qu'il importe de bien disposer, car il s'agit d'intermédiaires entre ce monde-ci et l'au-delà. Répandu partout en Indonésie (comme il l'était dans toutes les cultures mégalithiques), ce trait culturel est si profond dans l'archipel qu'il a traversé de façon plus ou moins occulte toutes les périodes et s'est combiné avec les vagues culturelles indo-bouddhique, chinoise, musulmane, puis chrétienne, qui ont successivement gagné l'archipel.

Les deux royaumes indo-bouddhiques de Srivijaya et de Malayu, auxquels nous allons nous intéresser, fournissent justement un exemple de ce phénomène de fusion culturelle. La richesse passée de Srivijaya et de Malayu, qui lui a succédé, se traduit aujourd'hui par de nombreuses ruines de temples et de palais somptueux. Après avoir beaucoup étudié les monuments ostentatoires érigés par les rois de ces royaumes, les archéologues ont récemment pris conscience qu'ils avaient un intéressant pendant dans les montagnes : des mégalithes.

Sumatra est une île de contrastes *(voir la figure)* : à une longue chaîne de montagnes occidentale s'oppose une vaste plaine orientale sillonnée de fleuves. Aujourd'hui encore, les habitants de la plaine affrontent les crues de la mousson



2. L'INDONÉSIE MÉDIÉVALE comportait plusieurs royaumes, dont celui de Srivijaya, dont la capitale était Palembang. Ce royaume jouait un rôle particulièrement important, car il contrôlait les routes maritimes – notamment le détroit de Malacca – par où transitait le commerce de toute l'Asie méridionale. Il a été supplanté au XIVe siècle par le royaume de Malayu. Certaines régions *(cartouche à gauche)* sont riches en mégalithes.

en construisant des maisons sur pilotis ou des bateaux-maisons. Bien souvent, les sols marécageux de la côte sont impropres à la culture. La forêt des hautes terres, en revanche, fournit aux insulaires des matériaux de construction, des épices et d'autres produits. Jusqu'à aujourd'hui, les ethnies des montagnes, qui vivent dans des vallées difficilement accessibles, ont préservé leurs cultures. La présence supposée de cannibales dans les hautes terres les a peut-être aidées…

Pendant que ces chasseurs-cueilleurs parcouraient la forêt, sur les rives des fleuves, en arrière des embouchures marécageuses, des villes apparaissaient. On y échangeait l'or, les produits alimentaires, le bois et d'autres marchandises des hautes terres, contre des objets de métal, du verre, de la céramique, ainsi que, probablement, des textiles et du sel. Sur la base de ce commerce, la dynastie des rajas (rois) du Srivijaya, installée à Palembang, a tissé un vaste réseau de relations politiques et économiques, où se sont intégrés un grand nombre de villes et de royaumes vassaux. Les inscriptions en sanscrit que l'on trouve jusqu'aux limites de la région montagneuse révèlent les serments d'allégeance de ces vassaux à Srivijaya.

Pour montrer leur puissance et pour unifier leur royaume sous le toit du bouddhisme, les rajas ont édifié de nombreux temples. Ils sont aussi parvenus à contrôler tout au long des IXe et Xe siècles la route maritime de Malacca, située entre Sumatra et la Malaisie péninsulaire, et ainsi la circulation des marchandises entre la Perse, l'Inde et la Chine. Les navires étrangers qui empruntaient cette route ou faisaient escale dans l'un des ports de Sumatra devaient s'acquitter de droits de passage. Srivijaya envoyait aussi ses marchands en Chine, qui en rapportaient porcelaine, métaux, soieries, etc., autant de biens qui se vendaient ensuite…

Invasion indienne

En 1025, une armée d'invasion indienne détruisit Palembang, de sorte que le royaume de Malayu, dont la capitale était à Jambi, sur la rivière Batanghari, se substitua à Srivijaya. Ses rois ont toutefois été incapables d'atteindre la puissance de leurs prédécesseurs de Srivijaya. Certaines parties de Sumatra tombèrent aux mains de royaumes de l'île voisine Java. Les conflits guerriers du royaume de Malayu avec ces voisins l'affaiblirent, puis, au XIVe siècle, il perdit son indépendance par rapport à Java. C'est alors que des sultanats musulmans s'établirent dans le Nord de l'île. Puis, à partir du XVIIe siècle, Sumatra a subi la colonisation européenne : Britanniques et Néerlandais se la sont disputée jusqu'à ce que les Bataves l'emportent au XIXe siècle.

Tandis que, partout sur l'île, des plantations supplantaient la jungle, les Européens se mirent à étudier les ruines malaises. En 1932, l'administrateur colonial, nommé Thomassen à Thuessink van der Hoop, publia un ouvrage répertoriant et décrivant les mégalithes découverts dans la province de Bengkulen sur le plateau de Pasémah. Sept ans après parut *Les royaumes oubliés de Sumatra*, de Friedrich Schnitger. Pour le compte de la Société néerlandaise de géographie, cet archéologue autrichien avait mené des recherches sur le terrain à Sumatra, auxquelles il avait ajouté l'ouvrage de van der Hoop. Avec d'autres chercheurs, Schnitger estima que les pierres dressées étaient anciennes de 3 000 à 4 000 ans, leur apparence préhistorique rappelant les menhirs et dolmens que l'on trouve depuis l'Ouest de l'Europe jusqu'au Levant.

Ces chercheurs ont donc postulé l'existence passée d'une culture mégalithique remontant au Néolithique, qui serait apparue sur la côte orientale de la Méditerranée avant d'entrer en expansion vers l'Est et l'Ouest au VIe millénaire avant notre ère. Cette théorie a généralement été acceptée jusqu'au milieu du XXe siècle, ce qui a poussé les archéologues de l'Asie du Sud-Est à laisser les mégalithes aux préhistoriens, pour ne s'intéresser qu'aux monuments faciles d'accès des basses terres.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Quand, le 27 décembre 1949, les Pays-Bas rendirent leur indépendance aux colonies indonésienne (la Nouvelle-Guinée occidentale n'a suivi qu'en 1962), l'étude et la conservation des monuments anciens incombèrent aux chercheurs autochtones. Vers la fin du XXe siècle, l'aide de la Fondation Suisse-Liechtenstein pour les recherches archéologiques à l'étranger a permis de réaliser les premières fouilles systématiques dans les hautes terres. Le désir d'étudier les liens avec l'Asie du Sud-Est révélés par les objets mis au jour m'a alors conduit dans la région perdue du Kérinci où, entre 2003 et 2008, j'ai dirigé un projet archéologique avec des collègues de Djakarta, de Palembang et de Jambi.

À partir de 2010, ce projet a été suivi par des recherches, subventionnées par la Fondation allemande pour la recherche, dans les hautes terres de Minangkabau plus au Nord *(voir l'encadré page 49)*. C'est ainsi que j'ai repris l'étude des mégalithes de Sumatra, 70 ans après van der Hoop.

Le nom de Kérinci désigne une région des montagnes de l'Ouest de Sumatra où, sur les bords d'un plateau fertile, se trouve le lac Kérinci, tandis qu'au Sud s'étend un réseau de vallées difficiles d'accès, où croît l'une des dernières grandes forêts pluviales de Sumatra. Nombre d'espèces animales menacées, tels le tigre de Sumatra ou le calao bicorne, vivent dans cette région devenue aujourd'hui le Parc national de Kérinci Seblat.

C'est dans une lointaine zone de ce parc que, année après année, nous avons mené nos explorations et nos fouilles. Parvenus en voiture au Sud du lac, nous marchions deux jours jusqu'au village de Renah Kemumu *(voir la figure 4)*, où l'on nous hébergeait. Des porteurs acheminaient pendant ce temps le matériel nécessaire à l'équipe. Depuis que, en 1990, Renah Kemumu s'est retrouvé au milieu du Parc national, ses 400 habitants sont dans l'illégalité. Ils ont pu résister jusqu'à présent aux tentatives de relocalisation de leur village, notamment en soulignant que la présence de vestiges prouve l'ancienneté de leur terroir… Outre l'hébergement, le village nous fournissait de la main d'œuvre ; l'équipe de campagne que nous avons constituée comptait jusqu'à 25 fouilleurs et de nombreuses autres personnes qui exploraient la région avec des guides afin de vérifier les on-dit relatifs à la présence d'un mégalithe.

Nous avons ainsi localisé 21 mégalithes, dont seuls quelques-uns étaient déjà connus ; de nombreux autres doivent encore se nicher dans la forêt vierge. La plupart des mégalithes de Sumatra et d'autres îles indonésiennes sont debout et forment des groupes de quelques exemplaires à plusieurs centaines, comme sur l'île de Nias, située à 125 kilomètres à l'Ouest de Sumatra. En revanche, les pierres de la région de Kérinci sont toutes isolées *(voir la figure 5)* et couchées (et le furent dès leur installation).

■ L'AUTEUR

Dominik BONATZ, archéologue, est professeur d'archéologie du Proche-Orient à l'Université libre de Berlin. Il dirige le projet archéologique de Tanah Datar.

Van der Hoop, A. N. J. Th. à Th. : Megalithische Oudheden in Zuid-Sumatra. W.J. Thieme& Cie, Zutphen 1932, Ill. 34

3. CES SCULPTURES DE PIERRE sont les premières à avoir été documentées dans la région. Le fonctionnaire colonial van der Hoop les photographia sur le plateau de Pasémah en 1931, mais les archéologues les ont jugées peu dignes d'intérêt, et les ont interprétées comme provenant d'une culture mégalithique supposée s'être étendue de l'Asie du Sud-Est jusqu'à l'Europe.

Dominik Bonatz

4. DANS LA VALLÉE DE SERAMPA, au sein de la région du Kérinci, où se trouve un grand Parc national, toute campagne archéologique est une aventure. Les anciennes zones d'habitation sont situées sur les sommets, de sorte que de longues heures de marche dans la jungle sont nécessaires pour les retrouver. Pour ce faire, l'auteur et ses collègues ont établi un camp de base dans le village de Renah Kemumu *(visible à l'arrière-plan)*, d'où ils partaient en exploration.

Les quatre photographies : Dominik Bonatz

5. LES MÉGALITHES MALAIS PRENNENT DES APPARENCES DIVERSES. Le plus souvent, ils sont disposés en groupes, telles ces pierres anthropomorphes photographiées sur l'île de Nias *(b)*, une île de la province de Sumatra, où subsisterait l'une des toutes dernières cultures mégalithiques du monde. Ce mégalithe courbe *(c)* de la vallée de Mahat, dans les hautes terres de Minangkabau à Sumatra, est tout différent. La région de Pasemah a aussi livré la « pierre à l'éléphant » *(d)*, dont la représentation plastique en ronde-bosse figure un guerrier qui s'agrippe aux oreilles d'un éléphant. Les mégalithes de la région de Kérinci, en revanche, sont isolés, couchés *(a)* et ornés de bas-reliefs abstraits, ici soulignés à la craie.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

La forme de base des mégalithes est conique ou cylindrique ; leur longueur peut atteindre 4,5 mètres, pour un diamètre d'au moins un mètre. Sur leurs surfaces et aux extrémités en forme de tambour, nous avons découvert de très nombreux bas-reliefs comportant des représentations figuratives ou florales stylisées. À la différence de celles-ci, les ornements des pierres de la région autour de Pasémah, dans le Sud de Sumatra, sont des représentations en ronde-bosse. Les habitants de Minangkabau ont quant à eux taillé dans les pièces brutes des piliers dont les extrémités supérieures sont courbes *(voir la figure 5)*.

Quelles étaient les fonctions de ces pierres dressées ? Même si la référence primordiale aux ancêtres est une constante, une grande variété de fonctions mégalithiques existe à travers les époques et l'Indonésie. En ce qui concerne les mégalithes courbes de la région de Pasémah, ils marquent des lieux funéraires. Du reste, leur curieuse forme s'est perpétuée dans les pierres tombales de la période musulmane de Sumatra. La fonction des mégalithes de la région de Kérinci était différente, puisque ces pierres dressées se trouvent toujours seules sur un sommet de montagne ou un bord de vallée, bref en un endroit exposé. La fouille de leurs voisinages immédiats a produit des débris de poterie, des lames d'obsidienne, des fragments métalliques ainsi que des trous de poteaux.

Des pierres dressées aux fonctions diverses

Comme les habitants de la région construisent toujours sur pilotis, nous avons en profiter pour étudier les techniques de construction employées dans la région autour de l'an 1000 *(voir la figure 6)*. Manifestement, on cherchait à obtenir des poteaux capables de résister avant tout aux intempéries plutôt qu'à l'humidité : aucune fondation en pierre n'a été retrouvée. Étant plus résistant à la charge que le bambou, le bois de l'arbre de fer *(Parrotia persica)* servait probablement à réaliser ces poteaux.

À Pondok, au Sud du lac Kérinci, deux trous de poteaux situés devant la façade longitudinale d'une maison attestent de la présence d'une entrée quelque peu monumentale. Au milieu de la maison, nous avons découvert un récipient en argile contenant plus de 600 perles de verre et un couteau de fer. Il s'agit sans doute d'une offrande faite aux ancêtres lors de la fon-

dation pour bien les disposer, une pratique qui perdure encore aujourd'hui.

Qui connaît les hautes terres de Sumatra aujourd'hui sait qu'elles sont couvertes de champs de riz en terrasses. Toutefois, ce paysage parfois superbe n'est apparu qu'avec les débuts de la colonisation européenne au XVIIIe siècle. L'étude des environnements précédents a montré qu'auparavant, on se contentait de cultiver dans les jardins essentiellement des plantes à tubercules, tels le taro et le yam. Cette pratique agricole persiste du reste dans les zones reculées, telle la région de Kérinci. Les céramiques mises au jour par nos recherches dans la jungle montrent qu'il en a été de même dans le passé.

Les paysans rendaient leurs champs à la jungle tous les deux ou trois ans, car la pluie en lessivait les sols défrichés, ce qui faisait baisser le rendement. Ils devaient donc créer des champs au loin, parcourir un long chemin afin de s'y rendre, et construire des huttes où séjourner plusieurs jours d'affilée quand c'était nécessaire. Cette économie agricole exigeait donc un mode de vie nomade. Même si les moyens de subsistance étaient produits au loin, le village restait le centre de la vie communautaire. Les nombreuses découvertes de céramiques à usage domestique signalent la présence passée d'activité et, partant, celle d'une interface entre la communauté villageoise et son milieu.

LA RECHERCHE D'UNE CAPITALE PERDUE

Pour des raisons inconnues, Adityawarman, qui a régné sur Malayu entre 1343 et 1375, quitta Jambi et fonda une nouvelle capitale dans les terres du peuple Minangkabau. Sans doute espérait-il que le déplacement vers les hautes terres de Sumatra lui assurerait une meilleure protection contre ses voisins et un meilleur accès à l'or de la région. Afin de retrouver et de documenter cette capitale, l'auteur et son équipe mènent depuis 2010 un projet archéologique à l'emplacement supposé de la cité.

Le déménagement de la cour royale est connu par des représentations du souverain en divinité gardant les frontières du royaume *(voir l'illustration)*, ainsi que par de nombreuses inscriptions en sanscrit sur des stèles de pierre. Adityawarman va fonder des temples, des monastères et un palais, ainsi que des systèmes d'irrigation. C'est cela qu'il s'agit de retrouver.

Pour le moment, ces chercheurs ont découvert de nombreux trous de poteaux sur la colline Bukit Gombak, en bordure de la vallée haute de Tanah Datar. Ces structures prouvent la présence ancienne de maisons et peut-être même d'un palais. Des débris de porcelaine chinoise de la période tardive des Song et Yuan (XIIe-XIVe siècle) ont aussi été retrouvés ; ils témoignent des échanges qui avaient alors lieu entre Sumatra et les marchés d'outre-mer. Il n'est pas encore possible de dire si cet endroit fouillé fut effectivement le siège du royaume d'Adityawarman et sa relation avec les autres sites fouillés et avec les mégalithes de Kérinci n'est pas encore éclaircie.

Gunkarta/CC-BY-SA-3.0

Parallèlement à la poursuite des fouilles, Arlo Griffiths, de l'École française d'Extrême-Orient, traduira les inscriptions attribuées à Adityawarman. De ce fait, les Minangkabau, qui, comme toutes les ethnies des hautes terres, n'ont pas laissé d'écrits et ont été ignorés par les chroni-

l'histoire. Étant donné leur importante contribution à la prospérité des royaumes de Sumatra, ce n'est que justice.

Dominik Bonatz

Zamolyi, nach Frdl. Gen. von Dominik Bonatz

Dominik Bonatz

6. DES TROUS DE POTEAUX retrouvés près du mégalithe de Pondok attestent de la présence ancienne d'une maison sur pilotis *(ci-dessus)*. Leur répartition étant proche de celle des pilotis des maisons traditionnelles indonésiennes actuelles *(en haut à gauche)*, l'auteur et ses collègues ont pu en proposer une restitution *(en haut à droite)*.

nourricier à la forêt. Nous soupçonnons que les mégalithes marquaient la présence d'une telle interface en affirmant l'importance du village qui les érigeait.

Autrefois, la datation de ces monuments reposait uniquement sur leur ressemblance avec les menhirs néolithiques européens. Or le mégalithisme se pratique sans interruption depuis la Préhistoire en Indonésie… La présence remarquée dès 1932 par van der Hoop de représentations de tambours de bronze sur les pierres dressées du plateau de Pasémah apporte un indice. Les tambours de bronze sont des objets rituels inventés au cours de la protohistoire par les Dong Son en Indochine (Nord Viêt Nam). Or ces objets richement décorés étaient échangés par les Dong Son, et parvenaient en Indonésie, où des artisans autochtones ont appris à les imiter. Un fragment de l'un de ces tambours a été découvert en 1936 au Sud du lac Kérinci. Est-il d'époque protohistorique ? Difficile à dire : la période de son arrivée est tout aussi incertaine que l'âge exact des reliefs représentant des tambours de bronze à Pasémah.

C'est pourquoi nous espérions que les fouilles nous permettraient de dater de façon plus fiable les mégalithes. Ainsi, des céramiques retrouvées dans le voisinage immédiat de ces pierres ont pu être datées des XI[e] et XIII[e] siècles, par luminescence optique. Cela recoupe l'ancienneté des biens, manifestement d'importation, découverts dans les hautes terres, tels ces objets en porcelaine et en pierre de la dynastie chinoise des Song (960-1279), ou ces perles provenant du bassin indo-pacifique datant du X[e] au XIV[e] siècle. Les monuments de Kérinci datent donc de l'apogée du royaume de Malayu, et fournissent la première date fiable de l'un des complexes de mégalithes de Sumatra.

Un dicton malais, qui date de l'époque des premiers sultanats islamiques, explique peut-être la fonction des mégalithes. Cette expression, *Serah naik, jaja turun*, signifie littéralement : « Tandis que le cadeau monte, le tribut descend. » La formule décrit probablement les échanges de biens entre le Srivijaya, le Malayu et les hautes terres au cours des siècles qui ont précédé la période musulmane. Ce dicton confirmerait donc que le Srivijaya tout comme le Malayu devaient leur richesse au commerce maritime des produits issus des hautes terres.

« Tandis que le cadeau monte, le tribut descend. »

Même si les habitants de ces montagnes devaient « payer tribut », ils étaient en position dominante dans les échanges. Les hautes terres où ils vivaient étaient en effet difficiles d'accès. L'exploitation des ressources de la forêt pluviale exigeait par ailleurs des compétences particulières. Ainsi, il semble probable que sans les « cadeaux » envoyés par les basses terres, il n'y aurait pas eu d'échanges. Les princes de Palembang et plus tard de Jambi prétendaient certes, dans leur langage de cour, recevoir un « tribut », mais ils se livraient en réalité à un commerce. Tandis que Malayu trouvait probablement ses partenaires commerciaux à Kérinci, Srivijaya faisait ses achats sans doute dans les hautes terres de Pasémah, dont Palembang, sa capitale, est plus proche. De fait, les mégalithes qui s'y trouvent datent

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Bonatz *et al.*, **From Distant Tales - Archaeology and Ethno-history in the Highlands of Sumatra**, Cambridge Scholars Publishing, 2009.

F. Brinkgreve et R. Sulistianingsih (éds.), **Sumatra, Crossroads of Cultures**, KITLV Press, 2009.

R. Ptak, **Die Maritime Seidenstraße**, C.H. Beck, 2007.

J. Miksic (éd.), **Indonesian Heritage : Ancient History**, Éditions Didier Millet, 2003.

Projet archéologique de Tanah Datar : www.geschkult.fu-berlin.de/e/vaa/Ausgrabungen/indonesien/index.html

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

l'impression, par l'art et la manière de représenter des objets de la culture dong-son qu'ils sont plus anciens, comme l'est le royaume de Srivijaya par rapport à celui du Malayu.

L'apparition des mégalithes de Kérinci et de Pasémah s'explique donc par l'intensification des échanges entre les premiers royaumes des basses terres et les habitants de la forêt pluviale des hautes terres. Vieux trait culturel indonésien, le mégalithisme a été réinvesti par les chasseurs-cueilleurs des hautes terres, au moment où ils se sont sédentarisés pour mieux faire commerce des ressources de cette forêt et de l'or de leurs rivières.

Auparavant, ils ne connaissaient pas la propriété, mais ils se mirent progressivement à fonder des cités et à cultiver les champs afin de pouvoir eux aussi profiter des « cadeaux » envoyés par les basses terres. Désormais, pour profiter des richesses procurées par les échanges avec les basses terres, il fallait rester sur son territoire et le protéger des intrusions d'autrui. De fait, on observe que ces anciens chasseurs-cueilleurs se sont établis partout où les cours d'eau et la disposition des vallées facilitaient les échanges. Les cités se sont probablement ensuite formées d'abord sous la forme d'alliances de villages, dont un mégalithe constituait une sorte de centre territorial signalant une volonté de présence durable.

Des pierres que se lançaient les dieux

La taille et le transport d'une pierre de plusieurs tonnes sous-entendent main-d'œuvre et méthodes adéquates. Le cas des deux dernières cultures mégalithiques d'Indonésie – celle de l'île orientale de Sumba et celle de l'île de Nias – montre que ce sont en général des membres influents de sociétés qui parrainent et dirigent l'érection d'une pierre dressée. Un tel engagement leur vaut une reconnaissance durable, puisque le donateur d'un mégalithe à la communauté continuera de vivre symboliquement à travers la pierre, devenant par là l'un des aïeux de la communauté. C'est pourquoi, une fois érigés, les mégalithes du Kérinci et de la région de Pasémah ont influencé durablement la culture des communautés montagnardes. Pour lutter contre cette influence, le sultan de Jambi est allé jusqu'à interdire la vénération de ces vieilles pierres.

Les résultats de nos fouilles reflètent l'ascension, puis le déclin du royaume de Malayu, puisque l'on constate que les biens importés se raréfient à partir de la fin du XIVe siècle et disparaissent au XVe siècle. Manifestement, le Kérinci avait perdu son partenaire commercial. C'est vraisemblablement à cette époque que l'habitude de dresser des mégalithes a disparu.

De nos jours, seuls des mythes en rappellent l'histoire : un récit très populaire dans les villages du Kérinci fait allusion à la présence ancienne de dieux hindous dans les volcans de Sumatra, qui se lancent des pierres lorsqu'ils se disputent. À part cela, seule l'archéologie rappelle que les puissants royaumes bouddhiques de Srivijaya et de Malayu ont dû leur prospérité à leurs fructueux échanges avec les communautés villageoises des hautes terres de Sumatra. ■

Technologie

Hélium : la pénurie menace

Christian Gianese

L'hélium, indispensable pour de multiples applications, obéit à des contraintes de production et de distribution complexes. Un contexte aujourd'hui si tendu que ce gaz inerte manque déjà.

L'ESSENTIEL

- L'hélium, dont il existe deux isotopes stables, l'hélium 3 et l'hélium 4, est de plus en plus utilisé.
- Des pannes d'usines de production et les dettes contractées par les autorités américaines pour établir un stock fédéral d'hélium ont conduit à un dérèglement du marché de l'hélium et à un doublement de son prix ces dernières années.
- Les attentats du 11 septembre 2001 ont provoqué une forte hausse de la demande d'hélium 3 pour des détecteurs de radioactivité. Il s'ensuit une forte pénurie de cet isotope et une envolée de son prix.

L'hélium, le deuxième élément dans le tableau de Mendeleïev, est gazeux dans les conditions habituelles ; il ne se liquéfie qu'à une température très proche du zéro absolu (–273,15 °C). Ce gaz chimiquement inerte ne sert pas qu'à gonfler des ballons ou à parler avec une voix étrange et hilarante quand on l'inhale. Il a d'importantes applications, en particulier pour le refroidissement à de très basses températures, où il présente de remarquables propriétés, telles que la superfluidité, encore beaucoup étudiées par les physiciens. Or l'hélium est rare, et il manque déjà. Indiquons d'où vient l'hélium, comment et où on le produit, quelles sont ses principales applications, avant d'expliquer pourquoi nous sommes proches aujourd'hui d'une situation de pénurie. Mais il faudra traiter séparément le cas de l'hélium 4 et celui de l'hélium 3, deux isotopes dont les propriétés et applications sont distinctes et dont les marchés sont sous tension pour des raisons différentes.

L'hélium est l'élément dont le noyau atomique comporte deux protons, d'où sa deuxième position après l'hydrogène (noyau constitué d'un proton) dans le tableau des éléments. Il peut exister sous deux formes stables : l'hélium 4 (noté $^4_2$He), dont le noyau est formé de deux protons et deux neutrons, et l'hélium 3 (noté $^3_2$He), qui a deux protons mais un seul neutron. L'atome d'hélium neutre a deux électrons, qui remplissent complètement une « couche électronique », raison pour laquelle l'hélium est inerte : il ne réagit chimiquement pas avec d'autres atomes et ne forme pas de molécules.

Après l'hydrogène, l'hélium 4 est l'élément le plus abondant dans l'Univers. La plus grande part de l'hélium s'est formée dans les minutes qui ont suivi le Big Bang, lors de la nucléosynthèse primordiale. Il s'agit du processus qui, d'après les cosmologistes, a produit les premiers noyaux atomiques légers : le deutérium (isotope de l'hydrogène doté d'un neutron en plus du proton), l'hélium et le lithium, grâce à des fusions successives de particules à des températures de l'ordre du milliard de degrés. La mesure de l'abondance de l'hélium dans le cosmos contribue d'ailleurs à fixer certains paramètres des modèles cosmologiques.

Cependant, cet hélium cosmique a disparu de notre planète. Sur Terre, l'hélium 4 est produit par la radioactivité alpha d'éléments lourds et instables, tels que l'uranium et le thorium, contenus dans différents minerais. Dans une désintégration alpha, le noyau lourd expulse une particule alpha (un assemblage de deux protons et deux neutrons, c'est-à-dire un noyau d'hélium 4) et se transforme ainsi en un noyau plus léger. Par exemple, la désintégration alpha du plutonium 244 correspond à la réaction :

$$^{244}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{240}_{92}\mathrm{U} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Ainsi, sous nos pieds, de l'hélium 4 est produit en continu. La croûte terrestre en contient 0,1 partie par million, soit 300 fois plus que l'or... Le réacteur nucléaire sur lequel nous vivons produit chaque année environ 3 000 tonnes d'hélium, soit 17 millions de mètres cubes de gaz. Une très grande part s'échappe de la surface du globe vers la haute atmosphère, où elle se perd dans l'espace. Il s'ensuit que l'hélium est très rare dans l'atmosphère terrestre : sa concentration, en volume, n'est que de $5{,}2 \times 10^{-6}$.

Il reste qu'un peu d'hélium se retrouve piégé dans des gisements de gaz naturel où il est emprisonné par des couches de roche imperméable. Sa concentration en volume dans le gaz naturel varie de quelques parties par million à quelques pour cent. C'est pourquoi on extrait l'hélium 4 du gaz naturel, et les plus grands producteurs d'hélium sont évidemment les pays ayant suffisamment de gaz naturel pour l'exploiter : les États-Unis, l'Algérie, le Qatar, la Russie, la Pologne...

Les poches de gaz naturel contiennent du méthane et d'autres hydrocarbures, principales sources d'énergie pour lesquelles ce gaz est exploité. Mais certains gisements contiennent aussi de petites quantités d'azote, de dioxyde de carbone, d'hélium et d'autres matériaux non combustibles. Afin de produire une qualité acceptable de gaz naturel, il faut éliminer ces « impuretés ». C'est durant ce processus que l'on récupère l'hélium. Il existe pour ce faire

1. L'HÉLIUM A ÉTÉ ABONDAMMENT utilisé lors de la course à l'espace, pour prérefroidir l'hydrogène liquide des moteurs des fusées. Ainsi, le décollage de *Saturn V* nécessitait 370 000 mètres cubes d'hélium. C'est l'un des facteurs qui ont conduit les États-Unis à créer une réserve fédérale d'hélium.

NASA

L'AUTEUR

Christian GIANESE, ingénieur au CNRS, est responsable du Centre de liquéfaction de l'Institut Néel (CNRS-Université Joseph Fourier), à Grenoble.

SUR LE WEB

Programme fédéral américain sur l'hélium :
www.blm.gov/nm/st/en/prog/energy/helium/federal_helium_program/federal_helium_program.html

Données du Service géologique américain (2012) :
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/helium/mcs-2012-heliu.pdf

D. A. Shea et D. Morgan, **The helium-3 shortage : Supply, demand, and options for Congress**, décembre 2010 : www.fas.org/sgp/crs/misc/R41419.pdf

BIBLIOGRAPHIE

D. Kramer, **For some, helium-3 supply picture is brightening,** *Physics Today*, vol. 64, pp. 20-23, mai 2011.

plusieurs méthodes, mais le procédé par distillation cryogénique est le plus répandu. Il consiste à refroidir le gaz et ainsi à solidifier tous les impuretés dans des colonnes de séparation. Cette opération achevée, l'hélium atteint une pureté de 99,99 pour cent et peut alors être commercialisé.

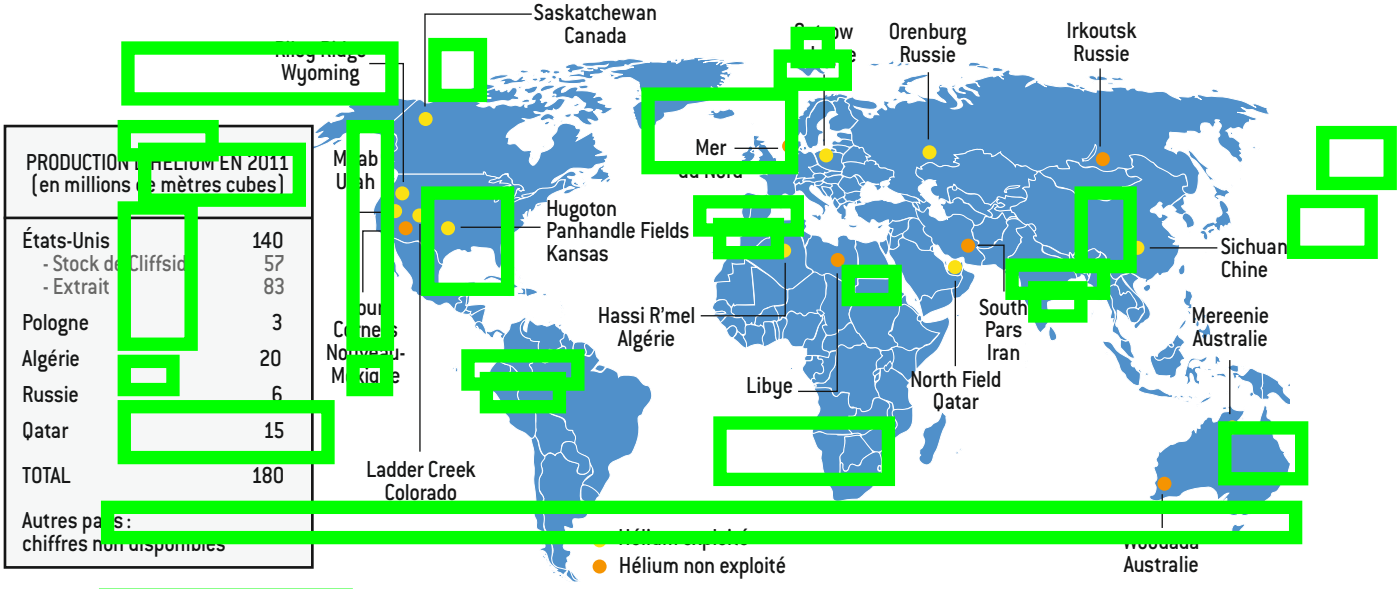
Pour mieux comprendre la situation actuelle, il est utile de faire un peu d'histoire, qui commence avec la découverte de l'hélium. Le 16 août 1868, lors d'une éclipse totale, à Guntur, en Inde, Jules Janssen, astronome français qui étudie le rayonnement solaire, observe une raie jaune brillante dans le spectre du Soleil. On pense alors que cette raie est celle du sodium. Mais le 20 octobre de la même année, l'astronome anglais Norman Lockyer, qui observe également cette raie jaune, conclut qu'elle est provoquée par un élément inconnu sur Terre. Il nomme alors cet élément hélium, d'après le terme grec *helios* désignant le Soleil. Près de 30 ans plus tard, en 1895, le chimiste britannique William Ramsay isole l'hélium dans la cléveite, un minerai à base d'uranium : en examinant le spectre d'émission de ce gaz inconnu, il se rend compte qu'il vient de découvrir le même élément que celui repéré dans le Soleil.

En 1903, un forage pétrolier à Dexter, dans le Kansas (États-Unis), suscite l'étonnement : le jet de gaz qui s'en échappe est incombustible ! Erasmus Haworth, géologue de l'État du Kansas, analyse alors ce gaz et constate qu'il contient 72 pour cent d'azote, 12 pour cent d'un gaz inconnu, et seulement 15 pour cent de méthane. Ainsi, le méthane est présent en trop faible proportion dans une masse de gaz inerte, ce qui ne permet pas au jet de brûler… Mais Haworth est aussi intrigué par le gaz « inconnu ». Une analyse plus poussée révèle que 1,84 pour cent de l'échantillon de gaz est de l'hélium. Cette découverte démontrait pour la première fois que l'hélium est disponible pour la production, comme sous-produit de l'exploitation du gaz naturel. Et c'est ainsi que les États-Unis sont devenus le premier pays producteur d'hélium.

L'hélium, un gaz stratégique

L'hélium, gaz sept fois plus léger que l'air, a été utilisé en premier lieu pour gonfler les aérostats. Le premier dirigeable gonflé à l'hélium dans le monde fut le C-7 de la marine américaine. Pendant la Première Guerre mondiale, la marine des États-Unis a subventionné trois petites usines de production d'hélium pour approvisionner les ballons captifs de barrage. Ces ballons étaient placés à proximité d'endroits stratégiques et forçaient les avions ennemis à voler à plus haute altitude, ce qui rendait leurs bombardements moins précis. En outre, les câbles d'acier qui les amarraient constituaient un grand danger pour les chasseurs en quête de proies à mitrailler.

L'hélium a donc très vite été reconnu comme un gaz stratégique et en 1925, le



PRODUCTION D'HÉLIUM EN 2011 (en millions de mètres cubes)	
États-Unis	140
- Stock de Cliffside	57
- Extrait	83
Pologne	3
Algérie	20
Russie	6
Qatar	15
TOTAL	180
Autres pays : chiffres non disponibles	

2. LES GISEMENTS DE GAZ NATUREL CONTENANT DE L'HÉLIUM *(carte)* et les chiffres de production connus en 2011 (tableau).

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

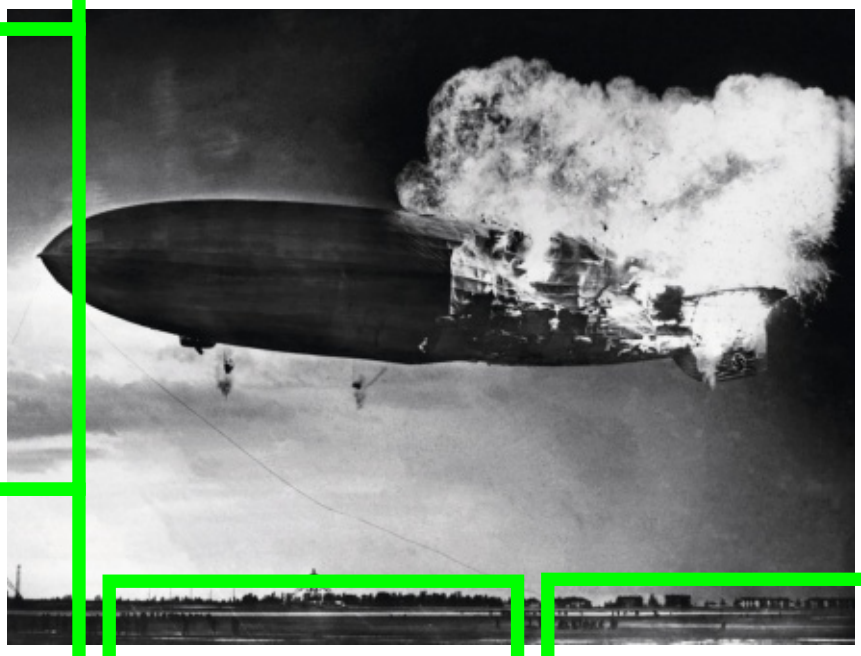
gouvernement américain décida de créer une réserve nationale d'hélium, gaz qui allait être conservé dans une énorme formation géologique située à Cliffside, au Texas.

Dans les années 1930, les Allemands ont conçu le plus gros dirigeable jamais construit, le zeppelin *LZ 129 Hindenburg*. Le projet initial prévoyait d'utiliser de l'hélium pour assurer sa sustentation. Mais avec l'arrivée des nazis au pouvoir, les États-Unis, seul pays fournisseur d'hélium, ont appliqué un embargo sur l'exportation du gaz. Les Allemands furent alors obligés de modifier leur projet et d'utiliser l'hydrogène à la place de l'hélium, avec les conséquences que l'on connaît : en 1937, un incendie enflamma le *Hindenburg*, faisant 36 victimes et mettant fin au transport de passagers par dirigeable *(voir la figure 3)*.

L'utilisation de l'hélium s'est accrue durant la Seconde Guerre mondiale, avec de nouvelles applications (gaz inerte pour la soudure, spectrométrie de masse, etc.). Avec l'avènement de la guerre froide, dans les années 1950, l'hélium prit une importance capitale. On l'a notamment utilisé dans la course à l'espace, pour préréfroidir l'hydrogène liquide des moteurs des fusées ; ainsi, une fusée *Saturn V* consommait environ 370 000 mètres cubes d'hélium pour décoller *(voir la figure 1)*. En 1965, la consommation d'hélium des États-Unis dépassait huit fois le maximum qu'elle avait atteint pendant toute la Seconde Guerre mondiale !

Vers 1960, pour faire face à l'augmentation de la demande, les États-Unis ont demandé à des entreprises privées d'extraire l'hélium pour le stocker au réservoir du Bush Dome, près du champ de Cliffside. Pour ce programme, 684 kilomètres de gazoduc ont été construits pour relier les usines d'extraction au Bush Dome. L'hélium était ainsi stocké, puis, en fonction des besoins, extrait, purifié et liquéfié pour être transporté à destination. Durant plusieurs années, les États-Unis ont ainsi produit 90 pour cent de l'hélium commercialement disponible dans le monde. Les usines d'extraction du Canada, de Pologne, de Russie et de quelques autres pays produisaient le reste.

Au milieu des années 1990, en Algérie, une nouvelle usine se mit à produire de l'hélium à Arzew. Très rapidement, avec une production de 17 millions de mètres cubes par an, elle a pu couvrir toute la demande européenne, soit environ 16 pour cent de la demande mondiale.



3. LE PLUS GROS DIRIGEABLE jamais construit était le zeppelin allemand *Hindenburg*. En raison de l'embargo sur l'hélium décrété par les États-Unis avec l'arrivée des nazis au pouvoir en Allemagne, il était gonflé à l'hydrogène. Le 6 mai 1937 à Lakehurst (New Jersey, États-Unis), un incendie se déclara pour une cause indéterminée et le gaz s'enflamma, provoquant la destruction de l'appareil et la mort de 36 personnes.

Parallèlement, le stock du Bush Dome atteignait un milliard de mètres cubes de gaz. Mais la réserve avait accumulé 1,4 milliard de dollars de dettes, liées au remboursement du programme « hélium » et au coût de modernisation de l'installation. Cela a conduit le Congrès des États-Unis à faire cesser progressivement son activité. Ainsi, en 1995, le gouvernement américain adopta un acte visant la privatisation de l'hélium, afin de récupérer les sommes investies dans la mise en place de la réserve et tout l'hélium de celle-ci devra être vendu d'ici 2015.

Les années 1990, période faste

En outre, cette loi stipule que les quantités d'hélium vendues chaque année doivent être constantes ; autrement dit, on ne tient pas compte de la demande ! Cette clause a eu pour effet de maintenir artificiellement bas le prix de l'hélium aux États-Unis (l'hélium américain est plus cher en Europe notamment en raison du transport). Et comme une étude américaine concluait qu'entre la production, la liquidation du stock d'hélium de la réserve fédérale et son utilisation, il y aurait un excédent d'hélium dans l'avenir, les utilisateurs n'avaient aucune raison d'économiser ou de recycler ce gaz…

Entre 2004 et 2006, deux nouvelles usines ont été construites, la première à Ras Laffan au Qatar, l'autre à Skikda en Algérie, ce qui a permis à ce pays de devenir

le deuxième producteur mondial d'hélium. Du côté de la consommation, les États-Unis sont de nos jours de loin les plus gros utilisateurs d'hélium ; en 2010, ce pays a consommé environ 80 millions de mètres cubes d'hélium, sur une distribution mondiale de 180 millions de mètres cubes. Pour l'Europe, la distribution (de l'ordre de 40 millions de mètres cubes) est assurée principalement par le gaz provenant d'Algérie, tandis que l'usine du Qatar et les États-Unis fournissent le continent asiatique, en plein développement industriel et qui devient un gros utilisateur (de l'ordre de 30 pour cent du volume mondial).

Un gaz très demandé

Entre-temps, avec les nouvelles technologies, l'hélium est devenu essentiel à une myriade d'activités médicales, industrielles et scientifiques *(voir la figure 4)*. Les hôpitaux du monde entier s'équipent davantage en appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique) dont la bobine supraconductrice est refroidie grâce à un bain d'hélium liquide *(voir la figure 5)*. Ainsi, en 2008, de l'ordre de 20 pour cent des quantités d'hélium distribuées ont servi à remplir les cryostats de tomographes d'IRM.

L'hélium est également utilisé pour purger les réservoirs des fusées telles qu'*Ariane*. Il est largement utilisé comme atmosphère inerte nécessaire à la production des fibres optiques, comme gaz protecteur dans la croissance du silicium et du germanium nécessaires aux circuits intégrés ou aux téléviseurs à écran plat. On l'utilise aussi dans l'industrie automobile pour la réalisation des coussins gonflables de sécurité (airbags). On le retrouve également dans les bouteilles de plongée sous-marine pour minimiser les effets de la narcose à l'azote, problème pouvant survenir lors de plongées profondes.

Enfin, l'hélium devenant liquide à 4,2 kelvins (–269 °C), il est utilisé dans les laboratoires de recherche sur les très basses températures et dans les grands instruments scientifiques, comme au LHC (le Grand collisionneur de hadrons du CERN, près de Genève) où l'hélium est indispensable aux grands aimants supraconducteurs. Cependant, les applications cryogéniques purement scientifiques ne représentent que trois pour cent de la distribution mondiale d'hélium.

Comment est-on arrivé à une situation de pénurie ? Au début de ce nouveau millénaire, alors que la demande d'hélium ne cessait de croître, l'usine algérienne de Skikda a connu d'importants dysfonctionnements. Par ailleurs, pour moderniser et modifier ses installations de traitement de gaz, la source d'Orenbourg, en Russie, a fermé durant plusieurs mois. Pendant la même période, pour diminuer leurs importations de gaz naturel, les États-Unis ont commencé à exploiter le gaz de schiste sur leur territoire. La conséquence a été qu'un de leurs plus gros fournisseurs, l'Algérie, s'est vu obligé de réduire l'exploitation de gaz naturel et, par là, la production d'hélium.

Le marché s'est déréglé en 2006

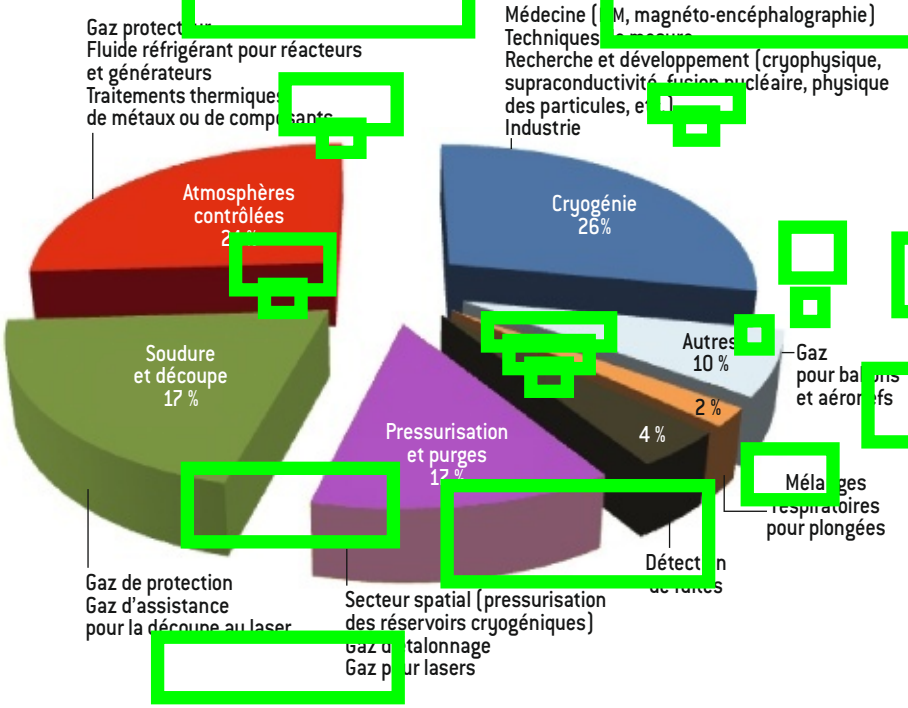
En 2006, les sources ne pouvant fournir la totalité de la demande, le marché s'est déréglé. Ce fut la pénurie, et cette rupture d'approvisionnement a touché tous les continents. Une forte hausse des prix s'en est suivie : ils ont doublé en cinq ans, et pendant la seule année 2008, les fournisseurs les ont augmentés de 50 pour cent ! Les laboratoires de recherche français, tels ceux du CNRS à Grenoble, pouvaient acheter l'hélium à environ 2,60 euros le litre en 2006 ; aujourd'hui, ils doivent débourser près de cinq euros par litre...

La pénurie et la hausse des prix ont conduit les utilisateurs à une certaine prise de conscience, notamment sur la nécessité de ne plus gaspiller l'hélium, gaz qui se fait de plus en plus rare sur Terre. Des cris d'alarme ont été lancés par des personnalités du monde scientifique. En Europe, l'hélium étant plus cher qu'aux États-Unis, les plus gros consommateurs utilisent d'autres gaz pour l'inertage (argon pour la soudure par exemple) ou recyclent l'hélium, comme les laboratoires de recherche qui disposent d'infrastructures permettant de mieux employer l'hélium et de le réutiliser. En revanche, cette parcimonie est peu appliquée par d'autres utilisateurs, surtout aux États-Unis où l'hélium est relativement peu coûteux.

Avec l'augmentation des prix et l'ouverture de nouvelles petites unités de production, en Australie notamment, l'offre parvient à répondre à la demande mondiale, mais le marché reste extrêmement tendu. La demande correspondant quasiment à l'offre, le risque de pénurie reste important pour les prochaines années.

Même si les sources sont indépendantes, toute la chaîne d'approvisionnement en hélium est interconnectée. Une panne sur une source en Algérie ou aux États-Unis engendre des difficultés d'approvisionnement à l'échelle mondiale. Ce cas s'est reproduit en 2011. Une des plus importantes usines d'exploitation (20 pour cent de la

4. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'HÉLIUM.



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

distribution mondiale) aux États-Unis a dû arrêter sa production pendant quelques mois, pour une maintenance planifiée. Elle a repris en septembre 2011. Début 2012, un simple arrêt était programmé pour une modification technique (remplacement d'échangeurs thermiques) sur l'usine d'Arzew en Algérie. Mais une suite de complications s'est produite lors de ces travaux, et il a fallu attendre la fin de l'été pour que la production nominale retrouve son niveau. Le marché s'est à nouveau déréglé et un certain temps sera nécessaire pour résorber les besoins.

La période est donc incertaine et le restera au moins jusqu'à l'installation et la mise en service de nouvelles usines : l'une dans le Wyoming aux États-Unis, une autre en Algérie, mais surtout la prochaine grosse usine de Qatar II, dont le démarrage est programmé pour novembre 2012. Quoi qu'il en soit, l'hélium reste un fluide non renouvelable et irremplaçable. Aussi, tous ses utilisateurs doivent faire un effort pour le recycler autant que possible. Sous la pression des coûts, l'hélium est davantage recyclé, mais une prise de conscience de tous les utilisateurs reste nécessaire. Malheureusement, seule une hausse importante du prix de l'hélium contraindra, sinon à une réduction de son utilisation, au moins à une utilisation plus réfléchie. C'est pourquoi certains spécialistes affirment qu'il conviendrait de multiplier son prix par 20 !

L'hélium 3, un gaz encore plus rare

La description qui précède porte sur l'hélium 4, l'isotope courant. Comme on l'a évoqué au début de l'article, il existe une autre forme de l'hélium, l'hélium 3, dont certaines propriétés physiques sont très différentes et donnent lieu à des applications très particulières. Bien que les quantités concernées soient beaucoup plus faibles, son marché est dans une situation bien pire que celui de l'hélium 4.

L'hélium 3 provient essentiellement de la nucléosynthèse primordiale, aux premiers instants de l'Univers. Sur Terre, il est très rare : on en retrouve 200 à 300 parties par million dans la croûte terrestre et il représente une fraction d'à peine $7{,}2 \times 10^{-12}$ de l'atmosphère dans son ensemble ! En revanche, l'hélium 3 peut être produit par la désintégration du tritium (^3H), isotope instable de l'hydrogène dont le noyau comporte un proton et deux neutrons. Ce dernier se transforme par radioactivité bêta en un noyau d'hélium 3 (avec émission d'un électron et d'un antineutrino).

CNRS-Cyril Frésillon

5. L'IMAGERIE MÉDICALE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE (IRM) utilise des champs magnétiques produits par des bobines supraconductrices, donc refroidies à l'hélium. En 2008, les tomographes d'IRM auraient employé environ 20 pour cent de l'hélium distribué dans le monde.

Le tritium est utilisé dans les bombes nucléaires et, pour garder celles-ci en état opérationnel, il faut régulièrement extraire l'hélium 3 produit par radioactivité et qui pollue le tritium. C'est ainsi qu'au cours de la guerre froide, les États-Unis et l'Union soviétique, qui ont stocké des dizaines de milliers d'armes nucléaires, ont accumulé d'énormes quantités d'hélium 3. Dans les années 1990, l'arrêt de la production des armes nucléaires a considérablement limité les quantités d'hélium 3 disponibles, mais les applications de cet isotope étaient alors fort réduites : elles se limitaient essentiellement à la recherche scientifique, qui en utilisait de faibles quantités. À l'époque, les administrations (ministères de la Défense, États) considéraient même ce gaz si inutile qu'elle l'évacuaient dans l'atmosphère !

Mais les attentats du 11 septembre 2001 à New York ont complètement changé la donne. Pour contrecarrer les plans de terroristes potentiels, le gouvernement américain a décidé d'installer des milliers de portiques de détection de matière nucléaire (*voir la figure 6*). L'idée était de contrôler les millions de conteneurs entrant chaque année dans le pays et d'éviter ainsi l'importation illicite de matière radioactive pouvant servir à fabriquer des « bombes sales » et à fomenter des attentats.

Or le fonctionnement des détecteurs de matériel nucléaire repose sur l'hélium 3, qui absorbe très efficacement les neutrons (selon la réaction $^3He + n \rightarrow {}^3H + {}^1H$). Ainsi, en dix ans, 1 300 détecteurs ont été installés dans les ports américains et aux passages frontaliers, chacun de ces appareils contenant au moins une cinquantaine de litres d'hélium 3. Résultat : alors que les réserves de ce gaz aux États-Unis étaient encore de 235 000 litres en 2001, elles se sont effondrées à moins de 50 000 à la mi-2010. Or les États-Unis étaient pratiquement le seul pays qui commercialisait l'hélium 3.

Depuis, il est devenu presque impossible de trouver de l'hélium 3 sur le marché. En 2010, une hausse fulgurante des prix s'est produite, la valeur marchande de l'hélium 3 passant de 150 dollars (environ 125 euros) le litre à des sommes flirtant aujourd'hui avec les 4 000 dollars (plus de 3 200 euros) pour la même quantité.

L'envolée des prix et forte pénurie

La pénurie d'hélium 3 touche non seulement la sécurité nationale, mais aussi la recherche scientifique et la communauté médicale. Des instruments scientifiques, dont la fabrication est achevée, ne peuvent fonctionner. Ainsi, les détecteurs de l'accélérateur de protons J-PARC (*Japan Proton Accelerator Research Complex*) construit à Tokaï, au Japon, ne sont que partiellement remplis en hélium 3 et ne peuvent donc atteindre les performances prévues. Des appareils tels que les

Canberra

6. À LA SUITE DES ATTENTATS DU 11 SEPTEMBRE 2001, des milliers de portiques de détection de radioactivité fonctionnant à base d'hélium 3 ont été installés aux États-Unis et ailleurs. Les réserves américaines d'hélium 3 se sont alors effondrées, provoquant une pénurie de cet isotope et une hausse vertigineuse de son prix.

réfrigérateurs à dilution, qui permettent d'obtenir des températures proches du zéro absolu et qui ne peuvent fonctionner que grâce à l'hélium 3, sont arrêtés ou attendent une hypothétique livraison de gaz pour démarrer.

Comme le souligne Henri Godfrin, chercheur du CNRS à Grenoble et spécialiste des recherches aux ultrabasses températures, l'hélium 3 sert de fluide cryogénique afin d'atteindre des températures très proches du zéro absolu, de l'ordre d'une centaine de microkelvins. Des températures indispensables notamment à la sensibilité de détecteurs de particules cosmiques destinés à traquer la matière noire et l'énergie noire, dont on pense qu'elles constituent la plus grande partie de l'Univers. H. Godfrin, comme d'autres chercheurs de sa spécialité, recycle l'hélium 3 dont il dispose. Certaines équipes en empruntent dans le cadre de collaborations avec d'autres instituts. L'hélium 3 étant un isotope stable, on peut le rendre à son propriétaire une fois les travaux terminés.

La recherche en imagerie médicale reste le dernier secteur, en dehors de la sécurité des États-Unis, à bénéficier de quelques privilèges en matière d'approvisionnement. Inhalé par le patient, l'hélium 3 (après polarisation magnétique) permet d'obtenir des images intéressantes des voies respiratoires des poumons, par la technique d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM). Cette technique d'IRM sur l'hélium 3 n'en est toutefois pas encore au stade clinique, et n'est pas incontournable.

Recherches bloquées et avenir incertain

Aujourd'hui, il est devenu presque impossible de lancer de nouvelles recherches nécessitant de l'hélium 3. Il est même simplement trop coûteux de l'envisager. Des efforts sont par conséquent portés sur un meilleur recyclage de cet isotope et sur une recherche d'alternatives possibles. Le gouvernement américain a sollicité les industriels pour fournir un nouveau matériel de détection de matières nucléaires fonctionnant sans hélium 3. Mais le choix est limité. Le seul autre matériau qui permet de détecter efficacement des neutrons est le bore. Une autre option est un matériau scintillant tel que le lithium 6, qui émet de la lumière lorsque les neutrons absorbés créent des particules chargées. Des détecteurs prototypes utilisant le bore 10 ont montré que l'on pouvait atteindre un assez haut niveau de détection des neutrons, et le gouvernement américain devrait prendre une décision définitive prochainement.

Toutefois, même si les futurs détecteurs de neutrons fonctionneront sans hélium 3, l'offre globale de cet isotope restera probablement inférieure aux besoins des scientifiques – 65 000 litres par an, alors que sa production est actuellement de 10 000 à 20 000 litres par an, selon une étude du ministère américain de l'Énergie (*Department of Energy*). L'urgence est donc maintenant d'augmenter la production.

Aux États-Unis, le recyclage et la purification du tritium contenu dans les ogives nucléaires devraient produire 8 000 à 10 000 litres d'hélium 3 par an, alors que les besoins américains seuls sont estimés à 13 000-15 000 litres par an ! Un supplément proviendrait du site de stockage de Savannah River, en Caroline du Sud, site de traitement des matériaux nucléaires, devrait fournir environ 10 000 litres, mais de façon ponctuelle.

Quelles sont alors les autres alternatives ? L'une serait de faire appel à des accélérateurs de particules. On peut en effet créer de nouveaux isotopes grâce à des collisions très énergétiques. La spallation nucléaire est ainsi une réaction nucléaire dans laquelle un noyau atomique est frappé par une particule incidente (neutron, proton, etc.) ou une onde électromagnétique de grande énergie. Par la violence de l'impact (énergie mise en jeu), le noyau cible se brise en produisant des jets de particules plus légères : neutrons, protons, ou noyau léger de deutérium ou d'hélium… mais cette solution n'est ni facile à mettre en œuvre ni bon marché.

Certains proposent même l'exploitation minière de la Lune. En effet, les missions *Apollo* ont ramené des roches dont l'analyse a montré qu'elles contenaient de l'hélium 3. D'où provient-il ? Le Soleil expédie dans l'espace interplanétaire, sous forme de « vent solaire », des particules – surtout des protons, des électrons et des noyaux d'hélium 3. En passant au voisinage de la Terre, ce vent solaire est dévié par le bouclier magnétique terrestre. Sur la surface lunaire, il s'accumule. Les scientifiques estiment qu'environ un million de tonnes d'hélium 3 se trouvent sur la Lune. Les Chinois envisageraient d'établir une base lunaire en 2024 et de commencer à extraire l'hélium 3 dès l'année suivante, si tant est que la technologie nécessaire soit mise au point d'ici là… Il reste qu'à ce jour, pour de nombreux scientifiques utilisateurs d'hélium 3, l'avenir reste incertain. Davantage encore que pour ceux d'hélium 4.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Pariscience

FESTIVAL INTERNATIONAL DU FILM SCIENTIFIQUE

8E EDITION . DU 4 AU 9 OCTOBRE 2012

Jardin des Plantes
Muséum national
d'Histoire naturelle

Entrée gratuite

Réservation conseillée sur
www.pariscience.fr

Six jours de projections, de débats, de rencontres et de découvertes... pour le grand public et les scolaires.

Six prix décernés, dont le Prix Pierre-Gilles de Gennes doté par le CNRS, remis au film qui valorise le mieux la recherche et la diffusion des connaissances.

Des films en compétition, un hommage à Albert Jacquard, des séances spéciales (« L'eau, l'or bleu » ,« Science et racisme »)...

Photo : Jacques ROMANET - jacquesbenault.com / Création graphique : Marlène T. / 06 16 91 31 08

Muséum national d'Histoire naturelle

universcience

île de France

MAIRIE DE PARIS

SCIENCES SUR SEINE

arte

Inserm

cnes

cnrs

PROCIREP

Le Monde

SCIENCES AVENIR

SCIENCE

Quotidien

Nature & Découvertes

Système immunitaire contre cancer

Eric von Hofe

Et si notre meilleur allié contre le cancer était... notre propre organisme ? Des traitements visant à apprendre au système immunitaire à reconnaître et à combattre les tumeurs sont en cours de développement.

Depuis les années 1970, les cancérologues proposent à leurs patients trois traitements principaux : la chirurgie, la chimiothérapie et la radiothérapie. Ces traitements, agressifs pour l'organisme, ont été peu à peu perfectionnés, afin d'atténuer leurs effets secondaires et d'augmenter leur efficacité. En outre, de nouveaux médicaments ciblés, tel *Herceptin*, sont apparus. Ils attaquent seulement les cellules cancéreuses, tandis que la chimiothérapie détruit toutes les cellules à croissance rapide (ce qui explique notamment qu'elle fasse tomber les cheveux). Pour le groupe des cancers invasifs (qui ne restent pas localisés), le taux moyen de survie à cinq ans est passé de 50 à 66 pour cent au cours des 40 dernières années. Malgré ces progrès, de nombreuses personnes qui passent ce cap ont une durée de vie diminuée.

Les chercheurs considèrent depuis longtemps qu'une piste de traitement prometteuse consiste à inciter le système immunitaire à mieux combattre les tumeurs. Toutefois, des décennies d'efforts se sont soldées par une succession d'échecs. Dans les années 1980, par exemple, on pensait que des molécules du système immunitaire nommées interférons pouvaient stimuler les défenses de l'organisme au point de guérir la plupart, voire la totalité, des cancers, mais l'espoir s'est vite évanoui. Aujourd'hui, si les interférons sont employés pour traiter certains cancers, ils n'ont pas l'efficacité et la polyvalence espérées. Durant les années 2000, de nombreux essais cliniques ont testé différentes approches fondées sur des vaccins (des substances visant à stimuler le système immunitaire du malade), mais sans succès. On commençait à croire que cette piste n'aboutirait jamais...

Pourtant, en 2010, un succès a enfin été obtenu : la FDA (*Food and Drug Administration*), l'Administration américaine qui délivre les autorisations de mise sur le marché des médicaments et des produits alimentaires, a validé le premier vaccin destiné au traitement du cancer (il n'est pas autorisé en Europe pour l'instant). Nommé *Provenge*, il ne guérit pas le cancer, mais associé à une chimiothérapie, il allonge de plusieurs mois la vie d'hommes atteints d'un cancer avancé de la prostate.

Pour développer ce vaccin, les scientifiques ont réexaminé la façon dont le système immunitaire agit contre les cellules cancéreuses et celle dont les tumeurs se défendent contre ses attaques. Aujourd'hui, les cancérologues affichent un optimisme prudent sur leur capacité à développer des traitements immunostimulants spécifiques, utilisables en même temps que la chirur-

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

gie, la chimiothérapie et la radiothérapie, avec des effets secondaires guère plus graves qu'un mauvais rhume.

Beaucoup d'entre nous se concentrent sur les vaccins thérapeutiques. Ceux-ci diffèrent de la plupart des vaccins usuels, dits préventifs, qui empêchent certaines infections dont les conséquences peuvent être graves (rougeole, hépatite B, poliomyélite, etc.). En effet, les vaccins thérapeutiques anticancéreux apprennent à l'organisme à reconnaître et à détruire les cellules tumorales présentes dans ses tissus.

La plupart des vaccins préventifs entraînent une simple réaction fondée sur les anticorps, efficace contre de nombreux types d'infections. Les anticorps sont des molécules qui se fixent sur les agents pathogènes, tels les virus de la grippe, et les empêchent d'infecter les cellules. Toutefois, de telles réactions ne sont en général pas assez puissantes pour détruire des cellules cancéreuses. Pour ce faire, le système immunitaire doit stimuler un groupe de cellules nommées lymphocytes *T*. Ces derniers se répartissent en deux types principaux, distingués par leurs récepteurs (des protéines situées sur leurs membranes externes). Les lymphocytes qui seraient les plus efficaces pour détruire les cellules cancéreuses présentent des récepteurs dits CD8 (on les nomme CD8+). Le second type est constitué des lymphocytes CD4+, qui portent des récepteurs CD4.

L'idée d'un vaccin contre le cancer n'est pas nouvelle. À la fin du XIX^e^ siècle, le chirurgien américain William Coley a cherché un tel vaccin, après avoir été informé de cas de rémissions ayant suivi des infections potentiellement mortelles chez des cancéreux. Pour simuler ces infections sans risque, Coley a chauffé un mélange de deux souches de bactéries mortelles de façon à les tuer pour les rendre inoffensives, puis l'a injecté à des patients. La préparation déclenchait de fortes fièvres, que Coley prolongeait par des injections quotidiennes. Il constata que la survie à long terme était supérieure chez les cancéreux ayant reçu sa préparation.

Une idée qui remonte à plus d'un siècle

Il émit l'hypothèse que les fortes fièvres de ses patients suractivaient leur système immunitaire affaibli, de sorte qu'il reconnaissait et attaquait les tumeurs. Il avança, de façon en partie justifiée, que sa préparation était une sorte de vaccin contre le cancer.

On utilisa quelque temps cette préparation, qu'on nomma toxine de Coley, contre divers cancers. Mais dans les années 1950, des médecins ont commencé à obtenir de meilleurs résultats avec la chimiothérapie. La toxine de Coley cessa alors d'être employée et la recherche de vaccins contre le cancer connut un coup d'arrêt.

L'ESSENTIEL

- **Les traitements classiques du cancer (chirurgie, chimiothérapie et radiothérapie) ont amélioré la survie des malades, mais beaucoup ne sont pas guéris.**
- **On cherche à stimuler leur système immunitaire pour qu'il combatte les tumeurs, une technique nommée immunothérapie.**
- **De nombreux essais ont échoué, mais une nouvelle génération de produits est en cours de développement. L'un d'eux est déjà commercialisé aux États-Unis.**

Cependant, l'étude du système immunitaire et de son éventuel rôle dans le cancer s'est poursuivie. Le biologiste allemand Paul Ehrlich avait suggéré en 1909 que le système immunitaire surveille et détruit en permanence les nouvelles cellules cancéreuses et, peu à peu, les chercheurs ont accumulé des preuves en faveur de cette théorie, dite de la surveillance immunitaire. En particulier, dans les années 1960, ils ont montré que le nombre de mutations spontanées dans les cellules humaines devrait entraîner bien plus de tumeurs malignes qu'on ne l'observe. D'une façon ou d'une autre, l'organisme décèle et détruit régulièrement des cellules cancéreuses.

Les preuves d'une réaction immunitaire

Même lorsqu'une tumeur résistait à l'éradication et s'implantait, le système immunitaire semblait continuer à la combattre, mais avec moins d'efficacité. En outre, on constata que les tumeurs étaient souvent infiltrées par des cellules immunitaires. D'autres expériences ont montré qu'à mesure de sa croissance, une tumeur libérait de plus en plus de substances qui supprimaient les lymphocytes *T*. Dès lors, comment renforcer l'efficacité de ces lymphocytes, capables d'éradiquer la tumeur ?

Une équipe de l'Institut américain du cancer (NCI, ou *National Cancer Institute*) a trouvé un début de réponse en 2002 : elle a montré que les lymphocytes *T* du type CD4+ sont essentiels pour que la réponse anticancéreuse soit efficace. Ce sont un peu les généraux du système immunitaire : ils donnent les ordres aux fantassins qui, dans ce scénario, sont les lymphocytes *T* de type CD8+, chargés de détruire les cellules tumorales.

L'équipe américaine, dirigée par Steven Rosenberg, a prélevé des lymphocytes *T* des deux types chez 13 patients présentant un mélanome avancé (un cancer de la peau ou des muqueuses), dont les tumeurs s'étaient développées dans tout l'organisme. Les chercheurs ont « activé » sélectivement les lymphocytes prélevés, en leur présentant des fragments de cellules de mélanome, pour qu'ils attaquent ces cellules. Ils ont ensuite cultivé de grandes quantités de ces lymphocytes, puis les ont réinjectés aux patients. Cette approche, nommée immunothérapie adoptive, est une sorte d'autotransplantation de cellules immunitaires, artificiellement modifiées hors du corps ; elle diffère de la vaccination, qui suppose la création par le système immunitaire de ses propres cellules sélectives au sein de l'organisme.

Les traitements antérieurs d'immunothérapie adoptive, qui n'utilisaient que les lymphocytes CD8+, avaient échoué, mais l'ajout de lymphocytes CD4+ au mélange conduit à la régression des tumeurs chez six malades. La plupart des patients ont ressenti des symptômes grippaux temporaires dus à leur traitement. Quatre d'entre eux ont aussi souffert d'une réaction auto-immune complexe, ayant dépigmenté en partie la peau.

Les résultats ont montré qu'il est possible de stimuler artificiellement une réponse immunitaire exploitant les lymphocytes *T*, de façon à détruire des tumeurs. Le nombre de cellules immunitaires clonées nécessaires dans cette expérience était énorme : plus de 70 milliards de lymphocytes CD8+ par patient. Mais au moins la communauté scientifique croyait-elle désormais que la thérapie immunitaire contre le cancer pouvait être efficace. L'étape suivante consistait à obtenir le même résultat de façon plus simple, c'est-à-dire sans devoir prélever des cellules du corps, les cultiver en grandes quantités et les réinjecter par la suite. Il fallait donc que l'organisme produise lui-même la plupart des cellules dont il a besoin.

Avec mes collègues de la Société *Antigen Express*, nous avions émis la même hypo-

Les recherches sur la stimulation du système immunitaire pour lutter contre le cancer ont commencé il y a plus de 120 ans.

Les années 1890
William Coley stimule le système immunitaire de patients cancéreux en leur injectant des mélanges de bactéries détruites.

1975
On crée des anticorps dits monoclonaux, capables de reconnaître précisément des fragments de pathogènes ou de tumeurs.

AP Photo

1909
Paul Ehrlich suggère que le système immunitaire peut empêcher le développement de tumeurs.

■ L'AUTEUR

Eric VON HOFE dirige la Société *Antigen Express*, à Worcester, aux États-Unis.

■ SUR LE WEB

Entretien avec Eric von Hofe : ScientificAmerican.com/oct2011/cancervaccine-podcast

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

LA LONGUE MARCHE

1980
Des chercheurs font produire en masse une molécule immunostimulante nommée interféron à des bactéries, qu'ils ont modifiées génétiquement.

Gary Retherford Photo Researchers, Inc.

1986
L'administration compétente américaine (la FDA) autorise l'interféron pour traiter la leucémie dite à tricholeucocytes. C'est la première immunothérapie contre le cancer validée.

1998
La FDA autorise l'anticorps *Herceptin* pour le traitement de certains cancers du sein.

1997
La FDA approuve le premier traitement par anticorps contre le cancer. Commercialisé sous le nom de *Rituxan* (*MabThéra* en France), il concerne une forme de cancer du système lymphatique.

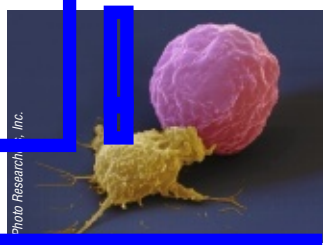


Photo Researchers, Inc.

2002
Des chercheurs montrent que des lymphocytes *T* peuvent lutter contre le cancer. Deux types de lymphocytes *T* sont nécessaires : les CD8+ *(en jaune, en train d'attaquer une cellule cancéreuse)* et les CD4+.

2010
La FDA approuve *Provenge*, premier vaccin stimulant le système immunitaire contre des tumeurs existantes. Il combat le cancer de la prostate.

thèse que le groupe de S. Rosenberg, à savoir qu'un vaccin contre le cancer devra stimuler à la fois la production de lymphocytes *T* CD4+ et celle de lymphocytes *T* CD8+. L'élaboration d'un tel vaccin passe par trois étapes. La première nécessite d'identifier une structure moléculaire associée à la tumeur maligne que le système immunitaire puisse identifier comme étrangère et, par conséquent, comme cible à détruire ; on nomme antigène une telle structure déclenchant une réponse immunitaire. La deuxième étape consiste à présenter l'antigène au système immunitaire, afin de l'activer contre les cellules cancéreuses pour qu'il les attaque efficacement. Enfin, lors de la troisième étape, il faut décider quels patients traiter et à quel stade de la maladie administrer le vaccin.

Quels antigènes pour le vaccin ?

Les mutations génétiques responsables de la prolifération incontrôlée des cellules cancéreuses entraînent aussi une production élevée de certaines protéines. Celles-ci sont donc susceptibles de jouer le rôle d'antigènes. Durant les dernières années, les biologistes ont examiné une large gamme de ces molécules, ainsi que des fragments de protéines (nommés peptides). À l'issue de cette phase, environ dix sociétés, dont la nôtre, ont sélectionné divers peptides, qui pourraient être directement injectés dans l'organisme. D'autres préparations ont aussi été étudiées, tels des fragments de matériel génétique codant des protéines de cellules cancéreuses, voire des cellules cancéreuses entières (préalablement irradiées pour les détruire).

Dans la perspective d'un vaccin synthétisable facilement et en grande quantité, les peptides ont de multiples atouts : ils sont petits, bon marché et faciles à manipuler. En outre, les peptides identifiés sont présents chez de nombreuses personnes ayant différents types de cancer, de sorte qu'ils pourraient être les antigènes d'un vaccin polyvalent. Les médecins n'auraient pas à composer des vaccins individualisés pour chaque patient. Enfin, tous les vaccins à base de peptides testés jusqu'ici ont des effets secondaires assez légers, tels qu'une irritation passagère au niveau du site d'injection et parfois de la fièvre ou d'autres symptômes grippaux.

Il y a dix ans, des chercheurs de notre société ont modifié un peptide utilisé dans un vaccin expérimental contre le cancer du sein. Nommé HER2, ce peptide est aussi la molécule permettant au médicament ciblé *Herceptin* de reconnaître les cellules tumorales qu'il combat grâce à un anticorps. Ce médicament est efficace contre certains types de cancer du sein. L'ajout de seulement quatre acides aminés à HER2 augmente notablement sa capacité à stimuler les lymphocytes *T* CD4+ et CD8+, qui attaquent les cellules cancéreuses produisant ce peptide. En 2011, une autre équipe a publié des données préliminaires comparant notre vaccin à deux autres, aussi fondés sur des peptides et stimulant uniquement les cellules CD8+ ; ces données suggèrent que nous sommes sur la bonne voie.

Certaines sociétés, telle *Dendreon* (le fabricant de *Provenge*, récemment approuvé par la FDA), ont parié sur d'autres solutions. Elles insèrent l'antigène dans un type de cellules immunitaires nommées cellules dendritiques. Disséminées dans

L'AJOUT DE QUATRE ACIDES AMINÉS au peptide HER2 augmente notablement sa capacité à stimuler les lymphocytes.

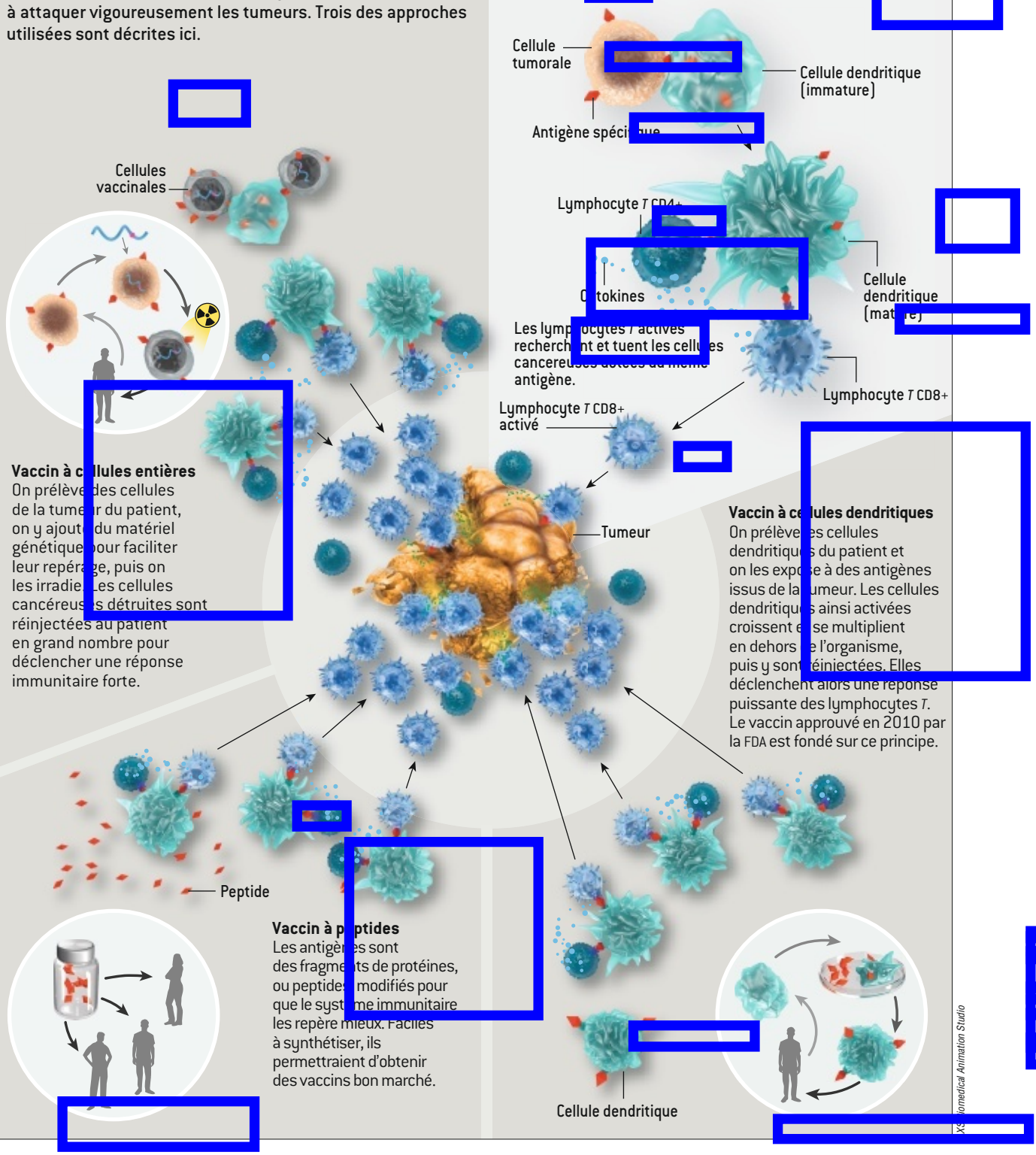
tout le corps, notamment dans les tissus en contact avec le monde extérieur (telles la peau ou la muqueuse du système digestif), les cellules dendritiques sont les sentinelles du système immunitaire. Elles comptent parmi les premiers défenseurs de l'organisme et alertent les lymphocytes *T* lorsqu'elles détectent un intrus : en leur présentant les antigènes, elles leur apprennent à reconnaître l'ennemi.

Les cellules immunitaires ne recevant d'ordres que de la part d'autres cellules immunitaires génétiquement identiques, les cellules dendritiques doivent être prélevées chez chaque patient, exposées à l'antigène puis cultivées pour qu'elles se multiplient et réinjectées. Un traitement complet coûte environ 70 000 euros. Parmi les effets secondaires, on note de la fièvre, des maux de tête et, plus rarement, un accident vasculaire cérébral. Une étude clinique a montré que des sujets atteints de cancer de la prostate à un stade avancé vivent en moyenne quatre mois de plus

TROIS STRATÉGIES POUR UN VACCIN THÉRAPEUTIQUE

Le système immunitaire n'identifie pas facilement les cellules cancéreuses comme des agents dangereux, comme il le fait avec les microbes. Des biologistes renforcent les défenses immunitaires en inondant l'organisme de cellules immunitaires nommées lymphocytes *T*, prélevées, puis modifiées et cultivées en dehors de l'organisme. Toutefois, les chercheurs préfèrent développer un vaccin thérapeutique, qui apprendrait au système immunitaire à attaquer vigoureusement les tumeurs. Trois des approches utilisées sont décrites ici.

Réponse immunitaire normale aux cellules tumorales
Une cellule immunitaire dite dendritique ingère une cellule tumorale, puis en présente des fragments nommés antigènes *(en rouge)* à deux autres types de cellules immunitaires : les lymphocytes *T* CD4+ et CD8+. Les premiers libèrent des cytokines, qui contribuent à l'activation des seconds. Les lymphocytes *T* CD8+ attaquent alors les cellules portant le même antigène. Malheureusement, cela ne suffit pas toujours à éliminer la tumeur.



Vaccin à cellules entières
On prélève des cellules de la tumeur du patient, on y ajoute du matériel génétique pour faciliter leur repérage, puis on les irradie. Les cellules cancéreuses détruites sont réinjectées au patient en grand nombre pour déclencher une réponse immunitaire forte.

Vaccin à peptides
Les antigènes sont des fragments de protéines, ou peptides, modifiés pour que le système immunitaire les repère mieux. Faciles à synthétiser, ils permettraient d'obtenir des vaccins bon marché.

Vaccin à cellules dendritiques
On prélève des cellules dendritiques du patient et on les expose à des antigènes issus de la tumeur. Les cellules dendritiques ainsi activées croissent et se multiplient en dehors de l'organisme, puis y sont réinjectées. Elles déclenchent alors une réponse puissante des lymphocytes *T*. Le vaccin approuvé en 2010 par la FDA est fondé sur ce principe.

XS Biomedical Animation Studio

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

(26 mois au lieu de 22) lorsqu'ils sont traités avec *Provenge*.

L'approbation de *Provenge* par la FDA et les résultats préliminaires prometteurs des études cliniques sur divers autres produits suggèrent que le développement de vaccins contre le cancer entre dans une ère nouvelle. À mesure que les études s'accumulent, on s'aperçoit cependant que l'efficacité de la thérapie immunitaire ne doit pas être évaluée de la même façon que celle de la chimiothérapie et de la radiothérapie. Ces dernières agissent assez vite : en quelques semaines, on peut juger de leur succès ou de leur échec en regardant si les tumeurs ont diminué. En revanche, lors d'un traitement par un vaccin anticancéreux, il semble qu'il faille attendre, parfois jusqu'à un an, avant que la croissance tumorale ne soit freinée.

Ce temps de latence n'est pas surprenant, car le système immunitaire n'attaque pas facilement des cellules qui ressemblent aux cellules normales de l'organisme – bien plus que ces bactéries ou des virus. Cette réticence à s'en prendre à des cellules de l'hôte est peut-être le plus grand obstacle à l'élaboration de vaccins thérapeutiques contre le cancer. Les tumeurs paraissent même augmenter parfois de taille après le traitement par des vaccins. Mais cette augmentation serait due à l'invasion de la tumeur par des cellules immunitaires et non à la division des cellules tumorales.

Quand administrer le vaccin ?

La lenteur avec laquelle le système immunitaire semble répondre aux vaccins anticancéreux en cours de développement a deux conséquences importantes. D'abord, ces vaccins seront probablement plus efficaces aux premiers stades de la maladie, quand les tumeurs ne sont pas assez volumineuses pour affaiblir le système immunitaire et que ce dernier dispose d'assez de temps pour déclencher une réponse puissante. En second lieu, lorsque la maladie est à un stade avancé, il faudra probablement réduire les tumeurs par un traitement classique avant d'administrer le vaccin. Cela facilitera le travail du système immunitaire, car les tumeurs sont d'autant mieux armées qu'elles sont grosses et ancriennes. Elles contiennent alors davantage de cellules libérant des substances immunosuppressives, lesquelles sont plus variées et relâchées en plus grande quantité. Toutefois, le cancer risque d'être incurable au stade terminal, quand les cellules cancéreuses sont trop nombreuses.

Malgré les obstacles, on sait maintenant que le système immunitaire d'un patient peut être mis à contribution pour combattre le cancer. Ce constat a ravivé les espoirs des chercheurs, tant dans les universités que dans l'industrie. De précédentes études cliniques, considérées comme des échecs, sont réexaminées et l'on vérifie qu'une réponse immunitaire n'est pas passée inaperçue. De fait, un vaccin potentiel contre le cancer de la prostate (*Prostvac*) a été partiellement réhabilité : bien que le composé n'ait pas atteint son objectif initial en matière de réduction des tumeurs, on a constaté qu'il augmentait la survie des patients. Cette découverte a eu lieu après la faillite de la petite société de biotechnologie ayant développé *Prostvac*. Heureusement, une autre société avait acquis les droits sur le médicament.

Des années de résultats frustrants nous ont appris à ne pas faire trop de promesses. Cependant, les avancées récentes poussent de plus en plus de chercheurs à croire aux vaccins thérapeutiques contre le cancer. Aux côtés de la chirurgie, de la chimiothérapie et de la radiothérapie, ils pourraient jouer un rôle important pour traiter certains cancers au cours de la décennie à venir. ■

Combattre sur tous les fronts

Une des difficultés pour mettre au point des vaccins thérapeutiques anticancéreux est que les tumeurs humaines sont très différentes de celles des souris utilisées lors des études précliniques. En effet, pour ces études, on greffe des tumeurs aux souris, ce qui entraîne une inflammation et la libération d'une grande quantité d'antigènes. Les tumeurs humaines, quant à elles, croissent sans endommager les tissus environnants et ont une structure (notamment vasculaire) différente. La situation est en train de changer : au cours des dernières années, plusieurs études ont été publiées sur des souris modifiées génétiquement qui développent des tumeurs. Elles devraient permettre de tester les vaccins de façon plus fiable.

Autre difficulté, le système immunitaire considère une tumeur comme un tissu quasi normal : les mécanismes de régulation (d'inhibition) qui empêchent de s'en prendre à l'organisme qu'il doit défendre freinent alors les réponses immunitaires antitumorales. Au cours des deux dernières années, plusieurs équipes ont inhibé [illegible] nismes et montré que cela favorise la survie des patients atteints de certains types de tumeurs.

Une autre piste prometteuse est née de l'observation – controversée – que le système immunitaire est stimulé par certains médicaments utilisés en chimiothérapie. Lorsqu'elles sont éliminées [illegible], par exemple, les cellules tumorales semblent relâcher des substances qui activent les lymphocytes T.

Dès lors, on cherche à associer tous les types de thérapies, pour renforcer l'efficacité du traitement : les chimiothérapies et les thérapies ciblées détruiraient les cellules tumorales, qui libéreraient alors des antigènes. En parallèle, des vaccins thérapeutiques apporteraient des antigènes artificiels encore plus [illegible] des substances inhibitrices empêcheraient les mécanismes de régulation négative du système immunitaire de bloquer l'attaque contre les tumeurs. Les nouveaux modèles précliniques de souris devraient permettre un premier tri [illegible] binaisons thérapeutiques à tester, avant de passer aux essais [illegible] chez l'homme.

Olivier Lantz,
Laboratoire d'immunologie, Institut Curie, Paris

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Brahmer *et al.*, **Safety and activity of [illegible]-PD-L1 antibody in patients with advanced cancer,** *The New England Journal of Medicine*, vol. 366, pp. 2455-2465, 2012.

M. DuPage *et al.*, **Expression of tumour-specific antigens underlies cancer immunoediting,** *Nature*, vol. 482, pp. 405-409, 2012.

M. Vergati *et al.*, **The place of T-regulatory cells in cancer vaccine development,** *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, vol. 2010, 2010.

S. Perez *et al.*, **A new era in anticancer peptide vaccines,** *Cancer*, vol. 116 (9), pp. 2071-2080, 2010.

Les langues du monde : un même débit d'information

Le débit de parole varie selon les langues, mais plus il est rapide, moins chaque syllabe véhicule d'information. Ainsi, quelle que soit la langue, la vitesse de transmission de l'information est quasi constante.

François Pellegrino, Christophe Coupé et Egidio Marsico

À la terrasse d'un café, dans le brouhaha ambiant, votre attention est soudainement attirée par un voisin parlant une langue étrangère. Sa voix vous semble traînante ou, à l'inverse, empressée. Cette impression, qu'on pourrait croire subjective, correspond à une réalité mesurable : le débit syllabique (le nombre de syllabes prononcées par seconde) varie d'une langue à l'autre. Nous l'avons récemment montré en comparant les débits syllabiques d'une soixantaine de locuteurs s'exprimant dans sept langues d'Europe et d'Asie.

L'impression que les Espagnols parlent vite, par exemple, est fondée : en moyenne, ils prononcent 26 pour cent de syllabes en plus par seconde que les locuteurs de l'anglais et 50 pour cent de plus que ceux du chinois mandarin. Pour autant, une même histoire durera-t-elle une fois et demie plus longtemps en mandarin qu'en espagnol ?

Non, car nous verrons que la différence de débit syllabique est compensée par la quantité d'information portée par chacune des syllabes (on parle de densité syllabique d'information) : une langue rapide recourt à un plus grand nombre de syllabes qu'une langue lente pour raconter la même histoire, chaque syllabe portant moins d'information. Finalement, les locuteurs des différentes langues échangent des informations à un débit comparable. Pour le montrer, nous présenterons d'abord les ensembles de syllabes (les inventaires syllabiques) à disposition des langues et nous préciserons la notion d'information dans ce contexte.

Des contraintes façonnant les langues

Au cours du XXe siècle, les linguistes ont étudié plusieurs centaines de langues, en insistant tantôt sur leurs différences et tantôt sur leurs ressemblances. En 1957, le linguiste américain Martin Joos a affirmé que les langues peuvent différer les unes des autres sans aucune limite et de façon imprévisible. À l'inverse, Noam Chomsky a supposé qu'elles sont toutes sous-tendues par une même grammaire innée et universelle, dont elles seraient des reflets déformés. Plus récemment, la linguistique dite fonctionnelle a adopté un point de vue différent : elle décrit à la fois la diversité des langues et les tendances qu'elles partagent comme résultant de la compétition entre des contraintes variées. Celles-ci peuvent être physiologiques (imposées par le système vocal), cognitives (issues notamment de la capacité du cerveau à traiter l'information), communicatives (ou

L'ESSENTIEL

- Grâce à la mesure du débit syllabique (le nombre de syllabes prononcées par seconde) et de la densité syllabique d'information (la quantité d'information portée par chaque syllabe), on évalue le débit d'information dans différentes langues.
- Ce débit est presque constant d'une langue à l'autre. Il correspondrait à une vitesse de transmission adaptée aux besoins de la communication.
- Pour l'instant, seules sept langues ont été étudiées. Ce nombre doit être augmenté pour confirmer et étendre les résultats.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

1. QUELQUE 6 000 LANGUES sont parlées dans le monde, parfois par des centaines de millions de personnes, tel le mandarin en Chine, ou par quelques centaines de locuteurs, comme le cavineña en Bolivie. Elles semblent aussi efficaces les unes que les autres pour transmettre l'information, bien que le débit de la parole varie notablement.

djem/Shutterstock

Salim October/Shutterstock

Jianhao Guan/Shutterstock

Dima Sobko/Shutterstock

REDAV/Shutterstock

LES AUTEURS

François PELLEGRINO, Christophe COUPÉ et Egidio MARSICO travaillent au laboratoire Dynamique du langage (DDL), à l'Institut des sciences de l'homme (ISH), à Lyon.

SUR LE WEB

M. Dryer et M. Haspelmath (éds), **The World Atlas of Language Structures Online**, Munich, Max Planck Digital Library 2011: http://wals.info/.

doit par exemple parler l'un après l'autre) ou sociale (la parole exprime qui l'on est vis-à-vis des autres, auxquels on s'adresse avec des formes plus ou moins polies, tels les pronoms personnels *tu* et *vous* en français). Elles façonnent en permanence les langues, qui sont, dès lors, des systèmes dynamiques complexes.

Depuis le début du XXIe siècle, le développement de méthodes d'analyse de ces systèmes, conjugué à la multiplication des données linguistiques disponibles, permet de mener des études quantitatives d'envergure. En particulier, on cherche à déterminer – sans réponse claire pour l'instant – si les langues présentent une complexité égale. Cette question est difficile, car aucune définition de la complexité ne fait consensus en linguistique : certains tentent de la quantifier à partir de la durée d'apprentissage d'une langue par les enfants, d'autres à partir du nombre d'opérations mentales (déductions, références au contexte, etc.) nécessaires au décodage d'un message... De façon schématique, la complexité d'une langue correspond à la taille du « mode d'emploi » qu'un locuteur doit maîtriser pour s'exprimer correctement dans cette langue.

Nos recherches s'inscrivent dans ces tentatives de « quantifier » les langues, mais ont un but différent : plutôt que de comparer la complexité des langues, nous cherchons à montrer qu'elles offrent la même capacité à communiquer, *via* la mesure du débit d'information.

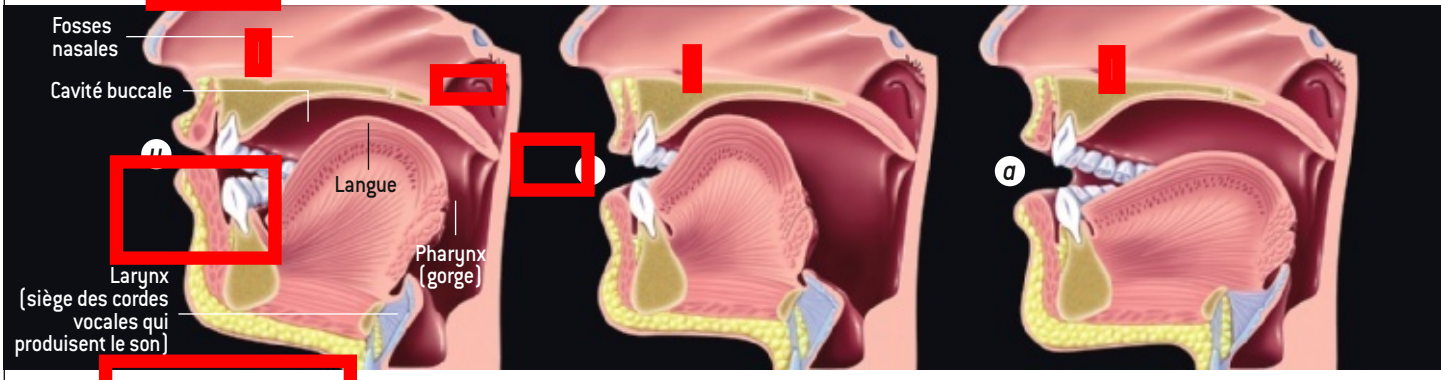
Cette mesure requiert la compréhension des fondements de notre système de communication : la production, la transmission et la perception de messages linguistiques sonores. Ces messages sont constitués de phrases décomposables en

LES SONS DES LANGUES DU MONDE

La parole est formée d'enchaînements de sons continus (les voyelles) et de sons « bloqués » (les consonnes). Ce sont les deux éléments de base du langage. Aucune langue n'est constituée uniquement de voyelles ou de consonnes – ce dernier terme signifiant d'ailleurs « qui sonne avec », sous-entendu avec une voyelle. Les sons sont orchestrés par le système vocal. Pour prononcer les voyelles, le système vocal module l'air de différentes façons (langue plus ou moins proche du palais, lèvres arrondies ou non…). Divers gestes articulatoires peuvent augmenter le nombre de nuances. Par exemple, en français, la nasalisation (l'envoi d'air dans les fosses nasales) transforme le son de *a* en *an*, tandis que [illegible] permet de distinguer entre les mots *Rate* (avec un *a* long) et [illegible], qui signifient respectivement une mensualité et un rat.

Malgré ces différences, la classe des voyelles est assez homogène du point de vue articulatoire et c'est (presque) toujours le même ensemble de paramètres acoustiques qui permet de les décrire dans les différentes langues. Ces paramètres, nommés formants, correspondent à des accumulations d'énergie dans certaines bandes de fréquences sonores, produites par des gestes articulatoires entraînant des phénomènes de résonance. Ainsi, le [u] est obtenu en concentrant quasiment toute l'énergie sonore dans des fréquences relativement basses (en dessous de [illegible] hertz), alors que [i] répartit l'énergie entre des basses fréquences (autour de 300 hertz) et des fréquences plus élevées, vers 2 000 et 2 800 hertz.

À l'inverse, les consonnes sont bien plus diversifiées tant du point de vue articulatoire que acoustique. Elles sont produites en entravant le passage de l'air, et le degré d'entrave est le premier paramètre de leur classification. On distingue par exemple les consonnes occlusives (telles *p*, *t*, *k*, *b*, *d*, *g*), créées avec une interruption totale du flux d'air, et les consonnes fricatives (telles *f*, *v*, *s*, *z*), réalisées avec un rétrécissement laissant échapper un peu d'air. Deux autres paramètres différencient les consonnes : le lieu d'articulation, qui précise où a lieu l'entrave dans le système vocal, et le voisement, qui indique l'activité des cordes vocales. Ainsi, le son [k] est produit en interrompant le flux d'air au dos de la langue et sans vibration des cordes vocales, tandis que le son [b] est réalisé par une fermeture complète au niveau des lèvres tout en maintenant une vibration des cordes vocales. Comme pour les voyelles, un certain nombre de gestes articulatoires accroissent [illegible] en allongeant la durée d'un son. Dans les différentes langues du monde, on a compté près d'un millier de voyelles et de consonnes



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

mots, eux-mêmes formés de séquences de sons élémentaires nommés phonèmes, qui sont propres à chaque langue. Les phonèmes comprennent des consonnes, des voyelles et parfois des diphtongues (des voyelles complexes dont le timbre se modifie en cours de prononciation, tel [ei] dans le mot anglais *day*). Précisons qu'on parle ici des voyelles et des consonnes phonétiques et non alphabétiques *(voir l'encadré ci-dessous)* : en français, la voyelle [o] peut ainsi s'écrire o, au, eau…

L'inventaire des phonèmes d'une langue ne suffit pas pour rendre compte de la façon dont elle « sonne », qui dépend aussi de leur agencement en syllabes. Pour ce faire, on doit donc s'intéresser aux syllabes, les éléments d'organisation rythmique de la parole (les « morceaux » en lesquels un locuteur découpe intuitivement les mots dans sa langue natale). Selon les langues, une même suite de phonèmes peut être intégrée dans une ou plusieurs syllabes : le français autorise ainsi la succession des sons [s] et [t] dans une même syllabe, comme dans le mot *stop*, mais pas le thaï ; en conséquence, les Thaïlandais prononcent souvent le mot *stop* en insérant une voyelle entre [s] et [t].

Les syllabes les plus simples sont constituées d'une unique voyelle. En français, certaines correspondent à des mots fréquents : la préposition *à*, la conjonction de coordination *et*, le nom commun *eau*… Les syllabes peuvent aussi comporter des consonnes, comme par exemple dans *strict*, une syllabe – et un mot – composée de trois consonnes, suivies d'une voyelle, puis de deux consonnes. On note une telle structure syllabique sous la forme CCCVCC, où la lettre C symbolise une consonne et la lettre V une voyelle.

Les structures syllabiques varient dans des proportions importantes entre les langues. Ainsi, la plupart des syllabes utilisées en espagnol ont une structure CV ou CVC, alors que l'anglais a une grande diversité syllabique, incluant des syllabes très longues. Par exemple, le mot *strengths* (signifiant *forces*) est transcrit par les phonéticiens [strɛŋ(k)θs] (θ traduit le son de *th*) et présente une structure CCCVC(C)CC (la parenthèse indique une consonne qui n'est pas toujours prononcée).

Enfin, des syllabes composées de consonnes et de voyelles identiques se distinguent dans certaines langues par des différences de « mélodie ». C'est souvent le cas en Afrique et en Asie, et parfois en Amérique. Là encore, la richesse de ces systèmes est variable : dans certains idiomes mexicains, une même séquence de phonèmes peut comporter jusqu'à huit mélodies distinctes, nommées tons, qui créent huit mots aux significations totalement différentes ! En Europe, la mélodie est parfois aussi utilisée, par exemple en norvégien, mais de façon plus limitée (on parle d'accents toniques et non de tons).

20 fois plus de syllabes en anglais qu'en japonais

Chaque langue a son propre nombre de briques élémentaires et des règles d'assemblage spécifiques pour construire ses syllabes. Une langue comme l'anglais, ayant un inventaire de phonèmes étendu et autorisant des syllabes complexes, offre des combinaisons bien plus nombreuses que le japonais, dont les phonèmes sont assez peu nombreux, et qui utilise préférentiellement des syllabes simples.

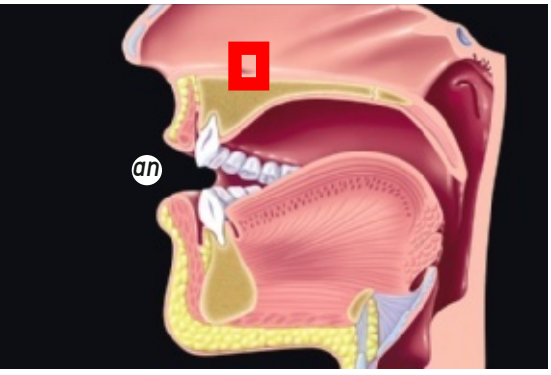
En analysant ces différents paramètres sur des centaines de milliers, voire de millions, de mots, nous avons comparé les inventaires syllabiques de sept langues (allemand, anglais, espagnol, français, italien, japonais et mandarin). Même sur un échantillon de langues aussi limité, nous observons des variations importantes de tailles des inventaires syllabiques, qui vont de 416 syllabes distinctes en japonais à près de 8 000 en anglais (soit presque 20 fois plus).

Nous nous sommes ensuite intéressés aux conséquences de ces différences sur le débit d'information du discours. Pour

obtenues entre autres grâce à l'ajout d'un trait secondaire (durée, nasalisation…).

Les études ont vite révélé que de nombreux phonèmes (représentés essentiellement par les consonnes et les voyelles phonétiques) se retrouvent dans les différentes langues. Les scientifiques s'accordent aujourd'hui sur le fait que les systèmes sonores des langues sont le fruit de deux contraintes antagonistes. La première concerne la production de la parole : les sons doivent être choisis afin de limiter l'effort articulatoire du locuteur. La seconde contrainte porte sur la perception et impose de faciliter la tâche de l'auditeur en créant un contraste suffisant entre les sons à différencier. Il résulte de cette double contrainte que les systèmes comportant peu de sons utilisent préférentiellement des gestes articulatoires simples (telle la modulation de l'ouverture de la bouche ou de la position de la langue), et que lorsqu'il y a plus de phonèmes, des gestes articulatoires plus compliqués sont nécessaires pour assurer une distance perceptuelle suffisante.

Malgré ces contraintes structurelles assez fortes – et identiques pour tous –, les langues ont de nombreux points communs. Toutes ont des consonnes occlusives et près de 90 pour cent possèdent [k]. Plus de 80 pour cent utilisent les voyelles phonétiques *i*, *a*, *ou*, et une majorité sont organisées autour de cinq voyelles de base : *i*, *é*, *a*, *o*, *ou*. Malgré cela, les langues sont très variées. Les systèmes sonores décrits aujourd'hui comportent de 11 à 141 consonnes et voyelles, pour une moyenne de 31 éléments (en moyenne un tiers de voyelles et deux tiers de consonnes). Si la majorité des langues ont moins de huit voyelles, certaines en ont jusqu'à 24, tandis que [illegible] varie de 6 à 95 ! À titre de comparaison, la langue française comporte moins de 20 consonnes et une quinzaine de voyelles.



Sophie Jacopin

Notre appareil vocal produit des sons variés, grâce à des gestes articulatoires parfois complexes, devant impliquer tous ses composants (bouche, gorge, larynx…). De gauche à droite, les configurations représentées correspondent à *a*, *i*, *a* et *an*. Cette dernière voyelle est obtenue en ajoutant au *a* un trait secondaire dit de nasalisation (on ouvre les fosses nasales).

cela, nous avons mesuré le débit syllabique (le nombre de syllabes prononcées par seconde) et estimé la densité syllabique d'information (la quantité d'information portée par chaque syllabe). La notion de quantité d'information utilisée ici est celle définie par le mathématicien américain Claude Shannon au milieu du XX^{e} siècle.

Au cours de ses travaux sur les télécommunications durant la Seconde Guerre mondiale, Shannon a montré que l'on peut estimer mathématiquement la quantité moyenne d'information transmise entre un émetteur et un récepteur, indépendamment de la signification du message. Dans le cas d'un discours constitué d'une suite de syllabes, on considère en première approche que l'auditeur ignore à chaque instant la syllabe qui sera prononcée ensuite. La quantité moyenne d'information transmise par syllabe est alors définie comme la « quantité d'incertitude » que l'énoncé de cette syllabe vient combler. Plus il y a de syllabes dans une langue, plus la probabilité de prédire la syllabe correcte en répondant au hasard est faible, et donc plus l'incertitude est grande et plus chaque syllabe porte d'information. Une syllabe prononcée en japonais (parmi les 416 possibles) porte donc moins d'information au sens de Shannon qu'une syllabe anglaise (issue d'un inventaire de près de 8 000 syllabes).

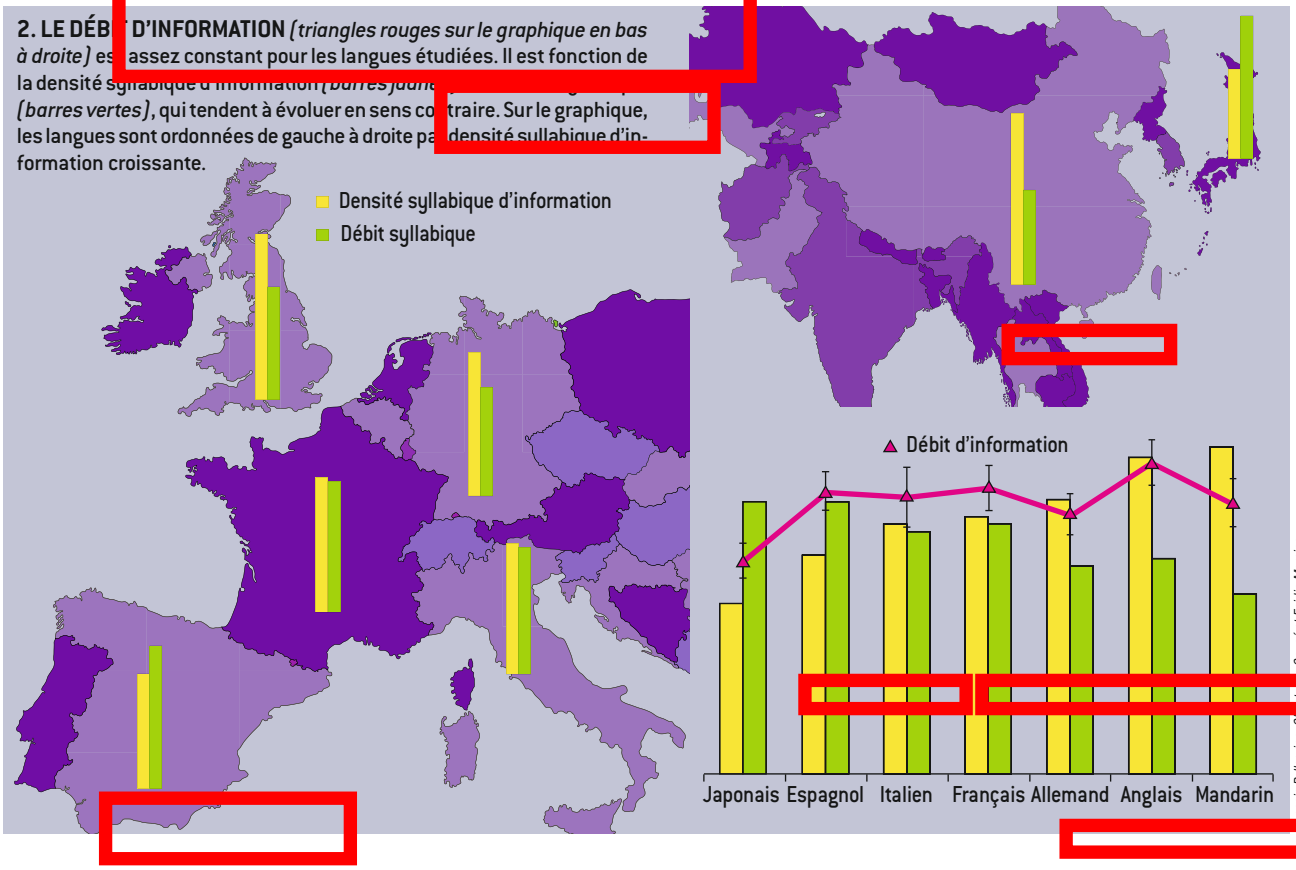
Quantifier l'information

En réalité, d'autres facteurs interviennent, un énoncé n'étant pas constitué de syllabes tirées au hasard. Les syllabes forment des mots : si quelqu'un prononce *an-ti-co-sti-tu-tio-*, la syllabe suivante sera à coup sûr *-nel-* et le fait de l'entendre apporte peu d'information. En outre, les mots obéissent à des règles grammaticales. Enfin, les syllabes sont plus ou moins fréquentes dans une langue donnée. En français, par exemple, on utilise bien plus souvent la syllabe qui constitue le mot *et* que celle qui correspond à *strict*. On traduit alors la densité syllabique d'information par une valeur numérique en recourant au formalisme mathématique de la théorie de l'information.

Une syllabe japonaise étant moins informative qu'une syllabe anglaise, on s'attend à ce qu'une même histoire nécessite bien plus de syllabes en japonais qu'en anglais. À encore, nous l'avons vérifié, avec une vingtaine de courts textes traduits dans chacune des langues de l'étude (*voir la figure 3*). Ainsi, les versions japonaises comptaient en moyenne 85 pour cent de syllabes supplémentaires par rapport à leurs équivalents anglais.

Faut-il en déduire qu'une même conversation durera près de deux fois plus longtemps en japonais qu'en anglais ? Cela paraît peu probable : toutes les langues du monde étant adaptées à leur fonction d'outil de communication, on imagine difficilement qu'un échange verbal prenne un temps très différent d'une langue à l'autre. Une langue où crier « Au secours ! » prendrait une minute plutôt que quelques fractions de seconde remplirait assez mal sa fonction !

Pour le confirmer, nous avons analysé des enregistrements des 20 textes lus par différents locuteurs. Nous avons montré que les variations de débit syllabique compensent les différences de quantité d'information portée par chaque syllabe : une langue telle que le japonais, qui nécessite plus de syllabes que l'anglais pour véhiculer la même information, a un débit syllabique plus rapide ; la densité d'information moindre est contrebalancée par une vitesse de transmission supérieure. Ainsi, entre les sept langues étudiées, la densité syllabique d'information et le débit syllabique



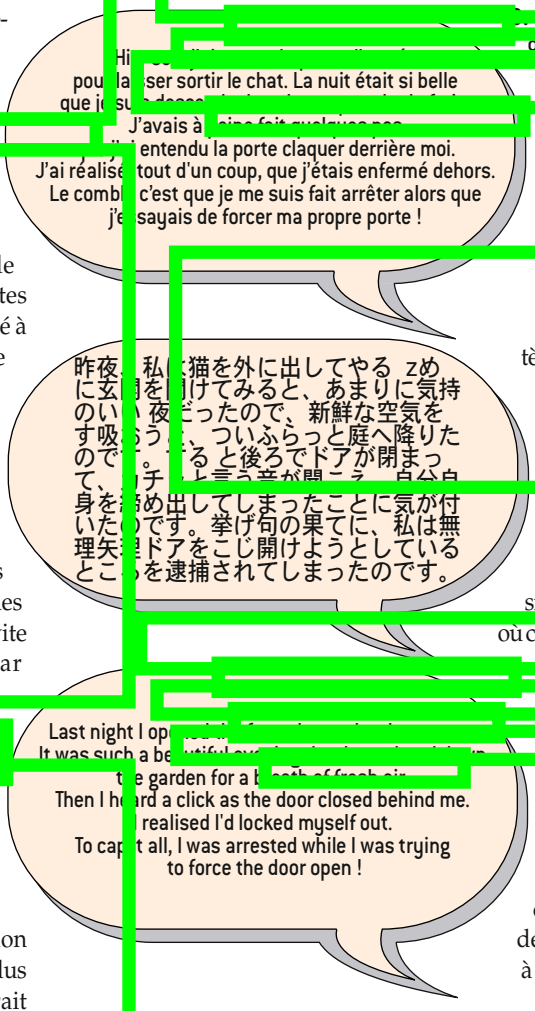
2. LE DÉBIT D'INFORMATION *(triangles rouges sur le graphique en bas à droite)* est assez constant pour les langues étudiées. Il est fonction de la densité syllabique d'information *(barres jaunes)* et du débit syllabique *(barres vertes)*, qui tendent à évoluer en sens contraire. Sur le graphique, les langues sont ordonnées de gauche à droite par densité syllabique d'information croissante.

François Pellegrino, Christophe Coupé et Egidio Marsico

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

varient en sens contraire, avec pour conséquence un débit d'information très voisin pour la plupart des langues – même si l'anglais et le japonais se démarquent (leurs débits d'information sont respectivement supérieur et inférieur à la moyenne).

Précisons qu'on parle ici des valeurs moyennes. Des différences de débit d'information demeurent à toutes les échelles : chez un locuteur confronté à diverses situations, entre individus, entre populations… Un individu peut ainsi s'adapter au contexte, non seulement en parlant plus ou moins vite, mais également en choisissant les mots employés, les tournures de phrases, etc. Les locuteurs d'une même langue présentent également des différences de débit « normal » d'élocution, certaines personnes parlant naturellement plus vite que d'autres. Dans notre étude, par exemple, les locuteurs français les plus rapides avaient un débit comparable à celui des locuteurs japonais les plus lents.



Ni trop vite ni trop lentement…

Pourquoi le débit moyen d'information ne varie-t-il pas dans des proportions plus importantes ? Un débit trop faible serait socialement pénalisant, car des interactions efficaces nécessitent l'échange d'informations. À l'inverse, un débit moyen trop rapide aurait des coûts physiologique et cognitif trop élevés. En effet, si chacun peut accélérer momentanément son débit de parole (et donc son débit d'information), cela requiert à la fois un supplément d'énergie biomécanique de la part du locuteur et un supplément de ressources neurocognitives de la part de l'auditeur. Plusieurs travaux récents suggèrent d'ailleurs que le cerveau traite plus efficacement les informations présentées à un rythme compris dans une plage étroite, voisine de celle que nous avons observée. Ils se fondent pour cela sur l'analyse des réseaux neuronaux mobilisés par l'audition et la compréhension du langage.

Nous poursuivons actuellement nos recherches en augmentant le nombre de langues étudiées (nous avons ajouté le turc et le coréen, ainsi que plusieurs langues d'Afrique subsaharienne et de Chine), avec l'intention de relier la densité d'information

SÉVERINE est l'un de ceux qui ont été tra- qués dans plusieurs langues pour tester les différences de densité syllabique d'information, de débit syllabique et de débit d'information. En japonais, langue où chaque syllabe porte peu d'information (la densité syllabique est faible), il comporte près de deux fois plus de syllabes qu'en anglais

à la complexité structurelle des systèmes linguistiques. Les questions sont multiples : quelles différences observe-t-on entre les langues où les mots sont souvent polysyllabiques et celles où ils sont plutôt monosyllabiques ? Comment la densité syllabique d'information varie-t-elle entre les langues aux schémas syllabiques très simples (CV ou CVC par exemple) et celles où ces schémas sont plus complexes (CCVCC par exemple) ? Etc.

Pour comparer les langues, il est également intéressant d'aller au-delà de la notion mathématique d'information que nous avons considérée, pour se pencher sur la notion plus générale de signification. Si les informations sont transmises à des débits comparables d'une langue à l'autre, des différences notables existent quant à ce qui est considéré comme une information pertinente à transmettre explicitement. Le mandarin et le japonais, par exemple, recourent à des éléments grammaticaux nommés classificateurs. Ceux-ci spécifient la forme, la taille ou d'autres caractéristiques physiques ou fonctionnelles des éléments dénombrés. Ainsi, la phrase « Trois chats boivent du lait » dite en japonais se traduit littéralement en français par « Trois animaux-chats du lait boivent ». Sur un autre plan, en japonais, les formules de politesse ont un rôle social très codifié et font partie de l'information jugée essentielle à transmettre lors de la communication.

Nos résultats soulignent qu'il existe plusieurs profils de langues. Ainsi, le mandarin se fonde sur des syllabes denses en information (notamment grâce aux tons) transmises à un débit assez lent, tandis que l'espagnol utilise des syllabes moins denses en information, mais émises plus vite. Cependant, le fait qu'une langue soit plus rapide ou plus dense en information ne la rend pas plus efficace pour communiquer, puisque le débit d'information est quasi constant. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Pellegrino *et al.*, **Across-language perspective on speech information rate**, *Language*, vol. 87, pp. 539-558, 2011.

J. Vaissière, **La phonétique**, Collection Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, 2006.

Bernard Comrie *et al.*, **Atlas des langues : L'origine et le développement des langues dans le monde**, Acropole, 2004.

Physique théorique

Boucles et arbres, à la recherche d'une nouvelle physique

Zvi Bern, Lance Dixon et David Kosower

On calcule les probabilités des processus impliquant les particules élémentaires à l'aide de diagrammes dits de Feynman. Une nouvelle méthode simplifie ces calculs et remet au goût du jour certaines théories unificatrices.

L'ESSENTIEL

- Les concepts et les méthodes introduits il y a plus de 60 ans par Richard Feynman ont atteint leurs limites dans les calculs de processus complexes impliquant des particules.
- Grâce à une nouvelle approche, les physiciens peuvent calculer de façon plus précise les résultats des collisions entre particules dans les grands collisionneurs tel le LHC.
- À un niveau plus fondamental, ces méthodes novatrices apportent un souffle nouveau à la recherche d'une théorie unifiée.

Kenn Brown and Chris Wren, Mondolithic Studios

Par [illegible] l'un d'entre nous (L. Dixon) se rendait à l'aéroport de Heathrow à Londres. En entrant dans la station *Mile End* du métro londonien, il repéra un inconnu, un parmi les plus de trois millions de passagers quotidiens, et se posa la question suivante : quelle est la probabilité que cette personne sorte à *Wimbledon*, par exemple ? Comment répondre à une telle question, sachant que toutes sortes d'itinéraires s'offrent à l'usager du métro ? En réfléchissant à cette énigme, il se rendit compte qu'elle s'apparente aux problèmes épineux rencontrés par les physiciens qui cherchent à prédire les résultats des collisions entre particules dans les expériences modernes.

Le collisionneur LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons) du CERN, près de Genève, accélère des protons qui vont se percuter à des vitesses proches de celle de la lumière. Pour étudier ce qui ressort de ces collisions, les physiciens ont construit des détecteurs qui repoussent les limites de la technologie. Interpréter ce que les machines mesurent est un défi tout aussi grand, même s'il est moins visible. Au premier abord, cela peut sembler étrange, car le modèle standard des particules élémentaires et de leurs interactions est bien établi ; les théoriciens l'utilisent tous les jours pour prévoir les résultats des expériences. Pour effectuer les calculs, nous nous servons d'une technique développée il y a plus de 60 ans par le physicien américain Richard Feynman. Cette méthode est omniprésente. Les physiciens des particules l'ont apprise à l'université, et tous les livres et articles pour le grand public s'appuient sur les concepts de Feynman.

Pourtant, cette technique est devenue insuffisante pour traiter les problèmes les plus complexes. Elle offre un moyen intuitif et approximatif pour étudier les processus les plus simples, mais elle est trop lourde pour les processus plus compliqués ou pour les calculs de haute précision. Ces dernières années, nous avons développé avec nos collègues une nouvelle façon d'analyser les interactions de particules, qui contourne la complexité de la technique de Feynman. Nommée « méthode d'unitarité », elle revient à une façon très économique de prévoir ce qu'un usager du métro va faire en décomposant le trajet en un nombre limité de séquences avec une probabilité associée à chaque choix dans le parcours. De nombreux problèmes théoriques de la physique des particules, impossibles à traiter avec les méthodes classiques, ont pu être résolus grâce à cette nouvelle idée. Obtenir des solutions nous permet de mieux comprendre la théorie actuelle de la nature et ainsi de repérer toute mesure qui serait le signe d'une nouvelle découverte. Cette méthode a aussi produit de nombreux résultats pour une version idéalisée du modèle standard qui intéresse particulièrement les physiciens en tant que possible tremplin vers la théorie ultime de la nature.

Plus qu'une astuce de calcul

L'approche fondée sur l'unitarité est plus qu'une astuce de calcul. Elle suggère une vision radicalement nouvelle des théories des interactions entre particules, qui seraient gouvernées par des symétries cachées : une élégance insoupçonnée du modèle standard. En particulier, elle est à l'origine d'un étrange retournement de situation concernant les tentatives menées depuis des décennies pour unifier la théorie quantique et celle de la relativité générale d'Einstein en une théorie quantique de la gravitation.

Jusque dans les années 1970, les physiciens supposaient que la gravitation se comportait comme les autres interactions fondamentales, et cherchaient à l'englober dans les théories existantes. Mais quand ils appliquaient la technique de calcul de Feynman, ils trouvaient des résultats aberrants ou étaient bloqués par la difficulté des calculs. Découragés, les physiciens se sont tournés vers des idées plus révolutionnaires telles la supersymétrie, et plus tard la théorie des cordes.

En revanche, la méthode d'unitarité nous a permis d'effectuer des calculs envisagés dans les années 1980, mais qui semblaient à l'époque hors de portée. En particulier, elle se révèle exempte de certaines incohérences rencontrées avec la méthode de Feynman. La gravitation ressemble bien aux autres interactions, mais d'une façon inattendue : elle se comporte comme l'interaction forte, qui agit dans le noyau atomique et en lie les différents composants, mais en double exemplaire.

L'interaction forte est transmise par des particules nommées gluons ; la gravitation est supposée transmise par des particules nommées gravitons. Dans le nouveau schéma, le graviton [illegible] deux gluons agissant de conserve. Cette

idée est assez étrange, et même les spécialistes n'arrivent pas encore à se faire une bonne image de ce que cela signifie. Néanmoins, la propriété de double exemplaire offre une perspective nouvelle pour unifier la gravitation avec les autres interactions fondamentales.

Ce qui rendait la technique de Feynman si convaincante et pratique, c'est qu'elle donne une recette graphique simple pour représenter des calculs très compliqués. Elle résume ces derniers par des diagrammes qui correspondent aux différentes voies d'interaction de deux particules (ou plus) qui entrent en collision (les particules entrantes et sortantes étant fixées). Suivant un ensemble de règles détaillées que Feynman et ses collègues (notamment Freeman Dyson) ont établies, le théoricien calcule la valeur associée à chaque diagramme. La somme de ces valeurs détermine la probabilité du processus considéré.

Mais il y a une difficulté de taille : le nombre de diagrammes à dessiner est énorme, et en principe infini. Dans les applications pour lesquelles Feynman a initialement conçu ses règles, cet inconvénient n'avait pas d'importance. Il étudiait l'électrodynamique quantique, qui décrit les interactions des électrons et des photons. Ces interactions sont régies par un paramètre, le couplage, qui vaut environ 1/137. La petite valeur de ce couplage garantit que les diagrammes compliqués contribuent peu à la probabilité totale du processus considéré et peuvent donc être ignorés. C'est comme si l'on disait qu'il est plus probable qu'un usager du métro choisisse un itinéraire simple.

Deux décennies plus tard, les physiciens ont étendu la technique de Feynman à l'interaction forte. Ils ont ainsi créé la « chromodynamique quantique », qui est aussi régie par un couplage, mais sa valeur est très supérieure à celle du couplage électromagnétique. *A priori*, un couplage plus intense augmente le nombre de diagrammes compliqués que les théoriciens doivent inclure dans leurs calculs. Heureusement, à très courte distance ou très haute énergie, comme pour les collisions au LHC, le couplage de l'interaction forte diminue et, pour les collisions les plus simples, les théoriciens peuvent la encore se limiter aux diagrammes de Feynman les plus élémentaires.

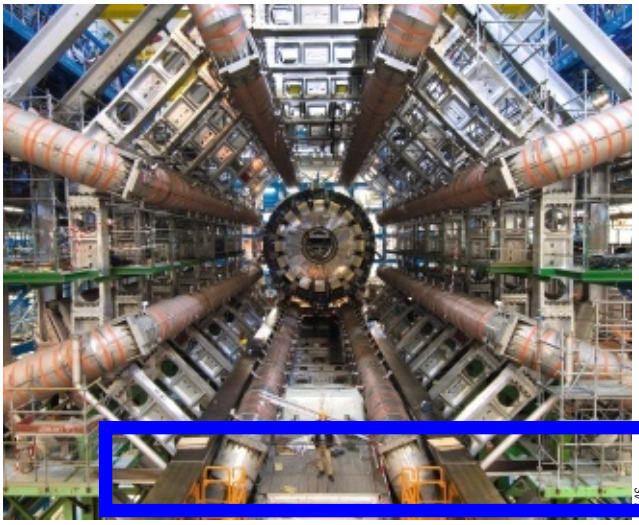
Des diagrammes trop problématiques

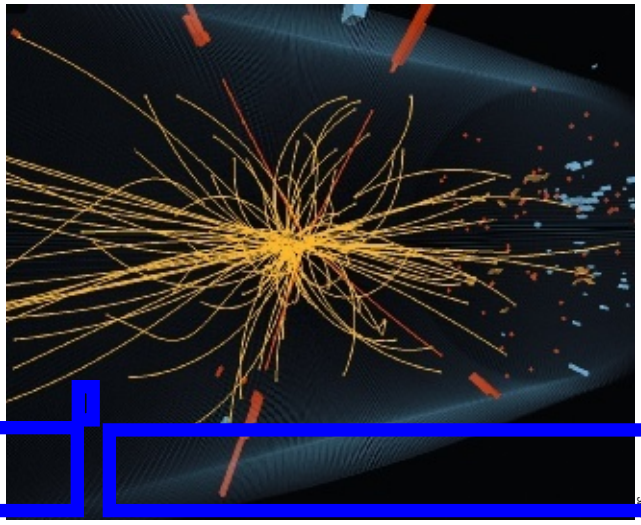
Mais pour les collisions complexes, toute la lourdeur de la technique de Feynman resurgit. On classe les diagrammes de Feynman en fonction du nombre de lignes externes et du nombre de boucles qu'ils contiennent *(voir l'encadré page 76)*. Les boucles représentent une des composantes fondamentales de la théorie quantique : elles mettent en jeu des particules « virtuelles », qui, bien qu'inobservables, ont un effet mesurable. Ces particules obéissent aux principes habituels de la physique, comme la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, mais leur masse peut différer de celle de la particule « réelle » correspondante. Les boucles représentent des cycles de vie éphémère : les particules naissent, puis s'annihilent très peu de temps après. Leur masse détermine leur durée de vie : plus elles sont lourdes, plus cette durée est brève.

Les diagrammes de Feynman les plus simples ne comportent pas de boucles et sont appelés diagrammes en arbre. En électrodynamique quantique, le diagramme le plus simple de tous représente deux électrons qui se repoussent en échangeant un photon. Les diagrammes se compliquent par l'ajout progressif de boucles. Cette technique de calcul est qualifiée de perturbative. Elle signifie qu'on part d'une estimation approchée (représentée par les diagrammes en arbre) et qu'on l'améliore progressivement en ajoutant des termes *a priori* de plus en plus petits (représentés par les diagrammes à boucles).

Par exemple, le photon échangé entre deux électrons peut disparaître spontanément en se transformer en un électron et un antiélectron virtuels, qui se recombinent très peu de temps après pour redonner naissance à un photon. À mesure que le nombre de ces particules virtuelles augmente, les diagrammes décrivent les effets quantiques avec une précision croissante.

Toutefois, même les diagrammes en arbre peuvent être un défi. Dans le cas de la chromodynamique quantique, si vous aviez le courage de considérer une collision entre deux gluons incidents qui produit huit gluons sortants, vous devriez





LE DÉTECTEUR ATLAS DU CERN *(à gauche, lors de sa construction)* enregistre le signal de centaines de particules produites lors de la collision entre deux protons de haute énergie *(à droite, une reconstitution numérique d'une collision dans le détecteur CMS)*. Les expérimentateurs estiment la probabilité qu'un événement se produise et la comparent avec les calculs théoriques.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

dessiner dix millions de diagrammes en arbre et calculer la valeur de chacun. Une approche récursive, introduite dans les années 1980 par Frits Berends, de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, et Walter Giele, maintenant au Fermilab, aux États-Unis, a permis de résoudre le problème pour les diagrammes en arbre, mais n'a pu être étendue aux boucles.

L'introduction d'une seule boucle fait exploser à la fois le nombre de diagrammes et la complexité de leur calcul. La force brute, même avec l'aide d'ordinateurs de plus en plus nombreux et puissants, finit par céder devant le nombre croissant de particules ou de boucles mises en jeu.

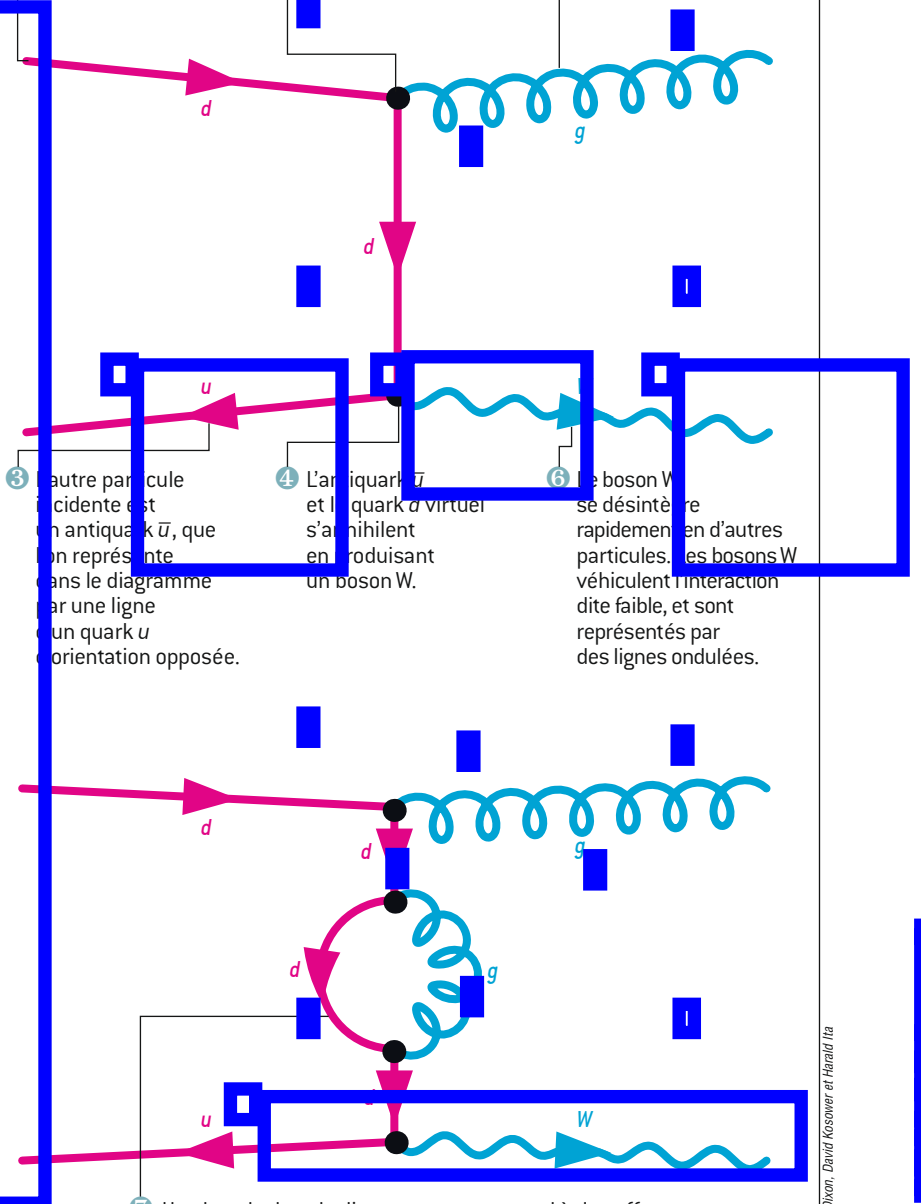
Une alternative fondée sur l'unitarité

Plus grave encore, ce qui était au départ une façon concrète de visualiser le monde microscopique peut au contraire le faire disparaître dans l'obscurité. Le grand nombre de diagrammes et leur complexité font perdre de vue la physique sous-jacente. De façon surprenante, le résultat final de calculs laborieux peut être assez simple. Des diagrammes distincts peuvent se compenser quand on les additionne, et parfois des formules formées de millions de termes finissent par se réduire à un seul. Ces compensations suggèrent que les diagrammes de Feynman ne sont pas les bons outils pour la tâche – c'est un peu comme si on voulait enfoncer un clou avec une plume. Il doit exister une meilleure façon de s'y prendre.

Au fil des ans, les physiciens ont essayé de nombreuses autres techniques. Petit à petit, une ébauche d'alternative aux diagrammes de Feynman s'est dessinée. Notre propre participation à ces efforts a commencé au début des années 1990, quand deux d'entre nous (Z. Bern et D. Kosower) ont montré que la théorie des cordes simplifie les calculs de la chromodynamique quantique en résumant tous les diagrammes de Feynman pertinents à une seule formule. Grâce à ce résultat, nous avons analysé une réaction qui n'avait jamais été comprise en détail auparavant : la diffusion de deux gluons d'où émergent trois gluons, avec une boucle de particules virtuelles. Ce processus était très compliqué pour l'époque, mais il pouvait être entièrement décrit par une formule d'une remarquable simplicité, tenant sur une unique page.

QUAND LES PARTICULES ENTRENT EN COLLISION

Tout autour de nous, sans cesse, les particules élémentaires s'attirent, se repoussent, se heurtent ou s'annihilent. Pour résumer de façon simple le calcul des probabilités de ces interactions, Richard Feynman a créé une représentation par des diagrammes. Sur [illegible] et disparaissent, [illegible] se [illegible] de gauche à droite. Les particules incidentes viennent du côté gauche, les produits de la réaction partent vers la droite.



1. La première particule incidente est un quark *d*, un composant du proton. Comme toutes les autres particules de matière, il est représenté par une ligne droite.
2. Le quark *d* émet un gluon et devient un quark *d* virtuel. Les particules virtuelles constituent des étapes intermédiaires qui ne sont pas observables.
3. L'autre particule incidente est un antiquark $\bar{u}$, que l'on représente dans le diagramme par une ligne d'un quark *u* d'orientation opposée.
4. L'antiquark $\bar{u}$ et le quark *d* virtuel s'annihilent en produisant un boson W.
5. Le gluon *g* émis va participer à une autre réaction. Les gluons véhiculent l'interaction forte et sont figurés par des lignes hélicoïdales.
6. Le boson W se désintègre rapidement en d'autres particules. Les bosons W véhiculent l'interaction dite faible, et sont représentés par des lignes ondulées.
7. Une boucle dans le diagramme correspond à des effets de particules virtuelles qui sont créées spontanément. Ici, le quark *d* virtuel émet un gluon virtuel, puis l'absorbe.

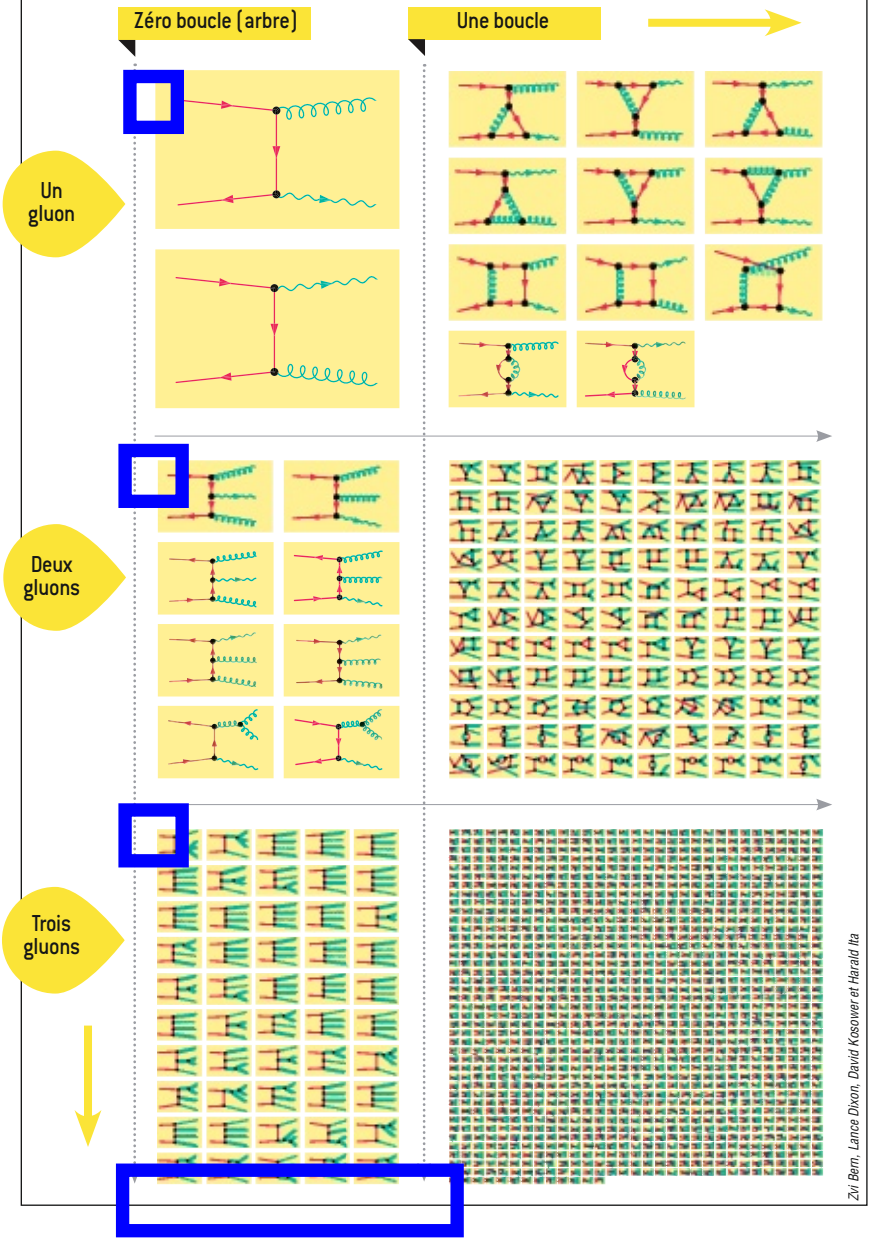
Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

La formule était tellement simple qu'avec David Dunbar, qui travaillait à l'époque à l'Université de Californie à Los Angeles, nous pouvions comprendre la diffusion presque entièrement en termes du principe d'unitarité, qui exige que l'addition des probabilités de tous les résultats possibles donne 100 pour cent. L'unitarité est implicite dans la technique de Feynman, mais tend à être masquée par la complexité des calculs. Nous avons donc développé une technique alternative qui la place au premier plan. Déjà dans les années 1960, des physiciens avaient eu l'idée de fonder les calculs sur l'unitarité. La suggestion n'avait pas abouti, mais comme souvent en science, elle est réapparue sous une nouvelle forme.

La clé du succès de la méthode d'unitarité est d'éviter l'utilisation directe de particules virtuelles, qui sont la principale raison pour laquelle les diagrammes de Feynman deviennent aussi compliqués. Ces particules ont des effets à la fois réels et fictifs. Par définition, les effets fictifs doivent s'annuler et disparaître dans le résultat final, bien qu'ils constituent une sorte de bagage excédentaire dans les calculs.

UNE MYRIADE DE DIAGRAMMES

Pour calculer la probabilité d'un processus entre particules, il faut considérer toutes les façons dont les particules peuvent interagir. Chaque diagramme de Feynman représente une possibilité. Une interaction quelconque d'un quark peut produire plus d'un gluon, ou impliquer plus d'une boucle de particules virtuelles, ou les deux à la fois. Les calculs deviennent rapidement impossibles à gérer.



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

Calculer l'interaction de façon plus globale

La méthode peut être comprise par analogie avec un système de métro complexe comme celui de Londres, où il existe de multiples itinéraires entre deux stations données. Supposez que nous voulions connaître la probabilité qu'un usager entré à *Mile End* sorte à *Wimbledon*. La technique de Feynman additionne les probabilités de tous les itinéraires concevables. Si on pouvait la transposer, les diagrammes de Feynman incluraient des trajets à travers la roche, en plus des trajets dans les couloirs et les tunnels. Ces trajectoires irréalistes sont les analogues des contributions fictives des boucles de particules virtuelles. Elles s'annulent au bout du compte, mais doivent être conservées pendant les étapes intermédiaires.

Avec l'unitarité, nous ne prenons en compte que les itinéraires qui ont un sens. Nous calculons la probabilité qu'une personne emprunte tel ou tel itinéraire en décomposant le problème : quelle est la probabilité que la personne passe par un tourniquet donné, un couloir donné ou un autre, et ce à chaque étape du voyage ? Cette procédure réduit considérablement la taille des calculs.

Le choix entre la méthode de Feynman et la méthode d'unitarité n'est pas une question de juste ou de faux. Toutes deux expriment les mêmes principes physiques de base et donneraient à la fin les mêmes valeurs de probabilité. Mais elles représentent différents niveaux de description. Un unique diagramme de Feynman, parmi les dizaines de milliers pour une collision complexe, est comparable à une unique molécule dans une gouttelette de liquide. En principe, on peut déterminer le comportement du fluide en suivant chacune de ses molécules, mais c'est fastidieux, voire irréaliste, et très peu éclairant. On a tout intérêt à considérer des propriétés plus globales telles que la vitesse du fluide, sa densité et sa pression.

De même, au lieu de considérer une interaction de particules comme étant construite élément par élément à partir de

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

diagrammes de Feynman, les physiciens peuvent souvent la représenter de façon globale. Nous nous concentrons sur les propriétés qui régissent le processus dans son ensemble – l'unitarité et des symétries spéciales auxquelles la méthode d'unitarité donne la prééminence. Dans des cas particuliers, nous pouvons obtenir des prévisions théoriques avec une parfaite précision, ce qui aurait exigé un nombre infini de diagrammes avec la technique de Feynman.

Cette méthode offre d'autres possibilités, comme la décomposition des processus. Une équipe de l'Institut d'étude avancée de Princeton – Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng et Edward Witten – a montré que, pour les diagrammes en arbre, il était possible de calculer la probabilité d'un processus impliquant cinq particules à partir d'une interaction à quatre particules suivie d'un dédoublement de l'une d'elles. Ce résultat est surprenant, car les deux processus semblent très différents. Il est ainsi possible de fractionner un problème en éléments plus simples.

Le LHC est le lieu idéal pour tester l'efficacité de la méthode : les collisions de protons sont très complexes. Feynman les avait autrefois comparées à la démarche qui consisterait à fracasser des montres suisses les unes sur les autres pour comprendre leur mécanisme, et sa technique de calcul a bien du mal à suivre ce qui se passe pendant le choc. Les protons ne sont pas des particules élémentaires, mais de petits assemblages de quarks et de gluons liés par l'interaction forte. Quand ils se heurtent violemment, les quarks et les gluons interagissent, et d'autres quarks et gluons sont produits. Ils s'agrègent finalement en particules composites qui émergent du collisionneur en jets étroits.

Ce fatras peut cacher des particules nouvelles, des symétries nouvelles, voire de nouvelles dimensions de l'espace-temps. Il est difficile de les distinguer des phénomènes déjà connus. Les différences sont minimes et passent facilement inaperçues. Cependant, avec la méthode d'unitarité nous pouvons décrire la physique ordinaire avec une précision telle que les phénomènes inédits se détacheront bien.

Par exemple, Joe Incandela, de l'Université de Californie à Santa Barbara, l'actuel porte-parole de l'expérience CMS du LHC qui implique plus de 2 000 physiciens, nous a suggéré un problème concernant la traque par son équipe de particules exotiques, celles qui constituent la matière noire, dont on suppose l'existence, mais qui n'a pas encore été identifiée. Si le LHC produit certaines de ces particules – qui interagissent très peu avec la matière ordinaire –, elles échapperont au détecteur CMS, en donnant l'impression que de l'énergie a disparu. Cette perte d'énergie signalerait la production de ces particules. Malheureusement, d'autres particules ont le même comportement. Par exemple, le LHC produit souvent un boson Z, lequel se désintègre une fois sur cinq en deux neutrinos qui, eux aussi, échappent au détecteur. Comment prédire le nombre de ces particules dont les effets imitent ceux des particules de matière noire ?

Appliquer la méthode aux collisions du LHC

L'équipe de J. Incandela proposait d'estimer le nombre de neutrinos produits dans le détecteur CMS et de voir s'ils expliquent entièrement la perte apparente d'énergie. Dans le cas contraire, cela pourrait signifier que le LHC crée de la matière noire. Cette idée est typique des méthodes indirectes utilisées par les physiciens qui n'ont pas les moyens d'observer directement certains types de particules. Mais pour que cette stratégie donne un résultat, l'équipe de J. Incandela avait besoin de connaître précisément le nombre de neutrinos : avec une précision insuffisante, cette stratégie échouerait. Avec plusieurs collègues, nous avons étudié le problème à l'aide des nouveaux outils théoriques et nous avons pu donner à J. Incandela l'assurance que la précision était suffisante. L'équipe CMS a appliqué sa technique et a obtenu des contraintes très strictes sur les particules de matière noire. Notre technique avait démontré son utilité.

Ce succès nous a incités à aller plus loin, avec des projets plus ambitieux. Au sein d'une équipe internationale, nous avons calculé la probabilité que les collisions au LHC produisent une paire de neutrinos accompagnée de quatre jets – un jet est un ensemble de particules se déplaçant sensiblement dans la même direction. Effectués au moyen des diagrammes de Feynman, de tels calculs auraient pris une dizaine d'années. La méthode d'unitarité nous a permis d'en venir à bout en moins d'une année. À notre grande satisfaction, une autre équipe du LHC, l'expérience ATLAS, a déjà comparé nos valeurs avec ses données, et les résultats sont pour l'instant en excellent accord.

LES AUTEURS

Zvi BERN est professeur de physique à l'Université de Californie à Los Angeles.

Lance DIXON est professeur au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford.

David KOSOWER est chercheur à l'Institut de physique théorique du Centre de recherche du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) à Saclay.

BIBLIOGRAPHIE

C. F. Berger *et al.*, **Precise predictions for W + 4 jet production at the Large Hadron Collider**, *Physical Review Letters*, vol. 106, n° 9, 2011.

K. Stelle, **Supergravity : Finite after all ?**, *Nature Physics*, vol. 3, pp. 448-45[illegible] 2002.

D. Kaiser, **L'outil universel de la physique**, *Pour la Science*, n° 333, juillet 2005.

S. K. Blau, **Unravelling as a tree : Hidden structures underlie Feynman diagrams**, *Physics Today*, vol. 57, n° 2, p. 19, 2004.

Kann Brown and Chris Wren, Mondolithic Studios

La méthode d'unitarité a également facilité la recherche du boson de Higgs, une particule postulée dans les années 1960 pour compléter le modèle standard. Une manifestation possible de cette particule est la production d'un unique électron, une paire de jets et un neutrino, le neutrino qui donne dans ce cas encore l'impression que de l'énergie a disparu. Le même résultat peut également être produit par des réactions de particules où le boson de Higgs n'intervient pas. Une des méthode d'uni-

tarité a été de calculer la probabilité précise de ces réactions qui sont sources de confusion. Et en juillet 2012, les physiciens du LHC ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule, qui est probablement le boson de Higgs.

Une utilisation encore plus impressionnante de la méthode d'unitarité est l'étude de la gravitation quantique. Pour que les physiciens puissent développer une théorie entièrement cohérente de la nature, on doit trouver un moyen de faire entrer la gravitation dans le cadre de la physique quantique. Si la gravitation se comporte comme les autres interactions de la nature, elle devrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui entreraient en collision et seraient diffusés comme les autres particules. Et nous pourrions dessiner des diagrammes de Feynman.

À la poursuite de la gravitation

Cependant, les premières tentatives visant à décrire la diffusion de gravitons en créant le plus simplement possible une version quantique de la théorie d'Einstein ont conduit à des prédictions aberrantes : des valeurs infinies pour des quantités qui devraient clairement être finies. Les quantités infinies ne sont pas, en elles-mêmes, un problème. Elles peuvent apparaître à des étapes intermédiaires des calculs même dans des théories bien sages comme le modèle standard, mais elles devraient s'annuler pour toutes les quantités mesurables. Pour la gravitation, ces annulations ne semblaient pas avoir lieu.

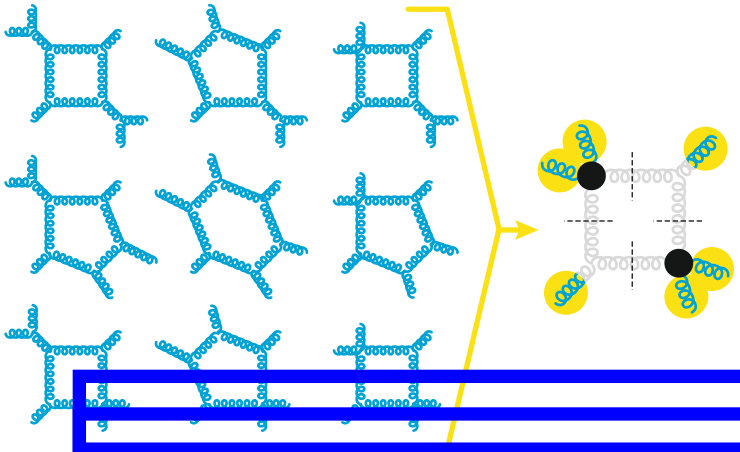
Une issue possible est l'existence de particules non encore découvertes qui mettraient au pas ces effets quantiques. Cette idée, incorporée par les théories dites de supergravité, a été très étudiée dans les années 1970 et au début des années 1980. Mais l'enthousiasme est retombé quand des arguments indirects ont suggéré que des infinis dépourvus de sens apparaîtraient toujours dans les diagrammes à trois boucles ou davantage. La supergravité semblait vouée à l'échec.

Cette déception a conduit beaucoup de physiciens à se tourner vers la théorie des cordes. Celle-ci se démarque du modèle standard : les particules élémentaires ne sont plus de minuscules points, mais des oscillations de cordes unidimensionnelles. Les interactions des particules sont réparties sur les cordes plutôt que

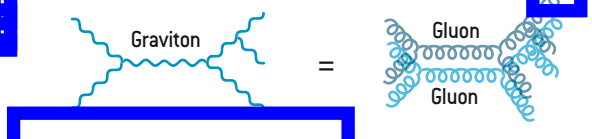
SE SIMPLIFIER LA VIE

Les auteurs [illegible] d'unitarité ». Ci-dessous, *à gauche*, on a représenté quelques exemples de diagrammes de Feynman à une boucle pour un processus à six gluons. Dans la méthode d'unitarité, quelques diagrammes généraux (dont un est représenté *à droite*) suffisent pour calculer le processus complet.

Contrairement aux diagrammes de Feynman, les échanges de particules virtuelles ne sont pas détaillés. On fixe les particules entrantes et sortantes *(en bleu)* et le diagramme est découpé selon les lignes pointillées pour obtenir quatre sous-diagrammes plus petits et plus simples à calculer. Les disques noirs représentent des processus calculés au niveau des arbres. Le produit des [illegible] donne une intégrale représentative du diagramme. Il faut calculer le coefficient et l'intégrale pour chaque diagramme de la méthode d'unitarité. La somme des intégrales pondérées permet alors de calculer la probabilité liée au processus.



La technique a mis en évidence des propriétés de la nature, implicites dans les théories, mais que le foisonnement des diagrammes de Feynman masquait. La plus frappante de ces découvertes est une voie possible pour inclure la force de gravitation. Celle-ci pourrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui présentent une remarquable ressemblance avec les gluons : [illegible] deux gluons. Plus précisément, la valeur correspondant à un diagramme avec gravitons s'apparente à un produit des valeurs correspondant à deux diagrammes identiques où les gravitons sont remplacés par des gluons.



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

concentrés en un point, ce qui évite les infinis. Mais d'un autre côté, la théorie des cordes se heurte à ses propres problèmes ; par exemple, elle ne fait pas de prédictions théoriques fermes pour les phénomènes observables.

La supergravité remise au goût du jour

Au milieu des années 1990, le Britannique Stephen Hawking a plaidé pour un réexamen des théories de supergravité. Il faisait remarquer que les études des années 1980 avaient pris des raccourcis qui rendaient leurs conclusions douteuses. Mais S. Hawking ne parvint pas à convaincre, car les physiciens avaient une bonne raison de prendre ces raccourcis : les calculs complets étaient hors de portée, même des plus brillants mathématiciens. Pour savoir avec certitude si un diagramme de Feynman à trois boucles de gravitons virtuels produit des quantités infinies, il faudrait évaluer 10^{20} termes. La question semblait devoir finir sur l'étagère des problèmes indécidables.

La méthode d'unitarité a changé la donne et a remis en selle la supergravité. Ce qui aurait nécessité 10^{20} termes avec la technique de Feynman, nous le faisons maintenant avec quelques dizaines. Avec plusieurs collègues, nous avons trouvé que les spéculations des années 1980 étaient fausses. Des quantités qui semblaient vouées à être infinies se révèlent finies. Cela signifie que les fluctuations quantiques de l'espace et du temps sont beaucoup plus inoffensives dans le cadre de la supergravité qu'on ne le pensait. La supergravité est moins absurde qu'elle ne le semblait.

Plus remarquable, trois gravitons interagissent exactement comme deux copies de trois gluons en interaction. Cette propriété de double exemplaire semble persister quel que soit le nombre de particules en interaction ou le nombre de boucles de particules virtuelles impliquées. Il reste à interpréter physiquement ce résultat mathématique et à vérifier s'il est toujours vrai. Pour l'instant, le point crucial est que la gravitation pourrait en fait ne pas être très différente des autres interactions fondamentales.

Comme souvent en science, à chaque fois qu'un débat se clôt, un autre s'ouvre. Immédiatement après nos calculs pour trois boucles, les sceptiques se sont demandé si les problèmes n'allaient pas surgir avec quatre boucles. Quand nous avons fait le calcul, nous n'avons pas décelé de difficultés. Ce succès nous a permis de remporter un pari mettant en jeu de bonnes bouteilles de vin.

La théorie de la supergravité est-elle complètement dépourvue d'infinis ? Ou bien son niveau élevé de symétrie limite-t-il ses excès pour un faible nombre de boucles ? Dans ce dernier cas, les problèmes devraient s'insinuer à partir de cinq boucles, et si sept boucles les effets quantiques devraient être suffisamment forts pour produire des infinis. David Gross, de l'Université de Californie à Santa Barbara, offre une bouteille de zinfandel californien si les infinis ne sont pas présents à sept boucles. Pour trancher ce dernier pari, certains d'entre nous ont entrepris de nouveaux calculs. Une absence d'infinis à sept boucles stupéfierait les sceptiques et pourrait enfin les persuader que la supergravité peut être une théorie cohérente. Mais même si elle l'est, cette théorie ne rend pas compte d'autres types d'effets, non perturbatifs, qui sont trop infimes pour être vus dans l'approche boucle-par-boucle que nous avons suivie. Pour traiter ces effets, on risque d'avoir besoin d'une théorie plus fondamentale, peut-être la théorie des cordes.

Les physiciens aiment bien se représenter les nouvelles théories comme émergeant de nouveaux principes – relativité, physique quantique, symétrie. Mais parfois, ces théories émergent simplement d'un réexamen minutieux des principes que nous connaissons déjà. La révolution silencieuse de notre compréhension des collisions de particules nous a permis de déterminer les conséquences du modèle standard avec un luxe de détails, conduisant à des améliorations significatives de notre potentiel de découverte de la physique plus fondamentale. Plus surprenant, elle nous permet de suivre les implications non explorées de la physique d'hier, parmi lesquelles une piste négligée d'unification de la gravité avec les autres interactions connues. À de nombreux égards, la route qui mène à la compréhension des interactions des particules élémentaires n'est pas du tout comparable à un trajet dans le très prévisible métro de Londres : elle s'apparente plutôt à une virée dans le magicobus de Harry Potter, où vous ne savez jamais ce qui va se passer au prochain tournant. ■

HISTOIRE DES SCIENCES

Les multiples ancêtres du jeu de *Nim*

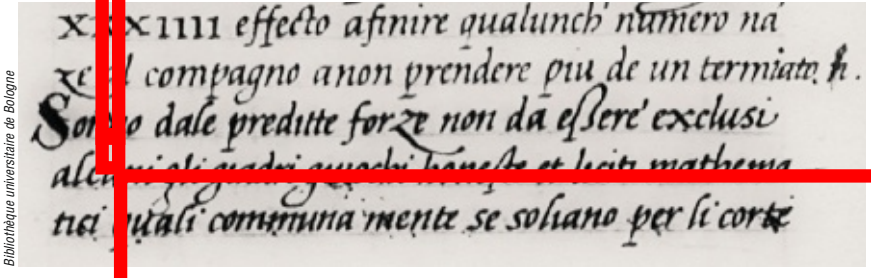
Piquet des cavaliers, Tiouk-Tiouk… Dès le XVI^e siècle en Europe, mais aussi en Afrique, se sont répandues diverses versions du jeu de Nim, *un jeu numérique simple qui fournit, au début du XX^e siècle, les bases de la théorie des jeux combinatoires.*

Lisa ROUGETET

Vous êtes assis face à votre adversaire. Une table où reposent trois tas d'allumettes vous sépare. Votre adversaire vient de jouer et vous laisse la configuration 7-5-3 : sept allumettes dans le premier tas, cinq dans le deuxième et trois dans le troisième. À votre tour de rôle, vous ne pouvez retirer d'allumettes (au minimum une) que d'une seule pile. Votre objectif est de prendre la (ou les) dernière(s) allumette(s). Par une diminution adéquate, vous pouvez vous placer en position gagnante et remporter la partie ; que faites-vous ?

Ce jeu, nommé *Nim* doit son appellation au mathématicien américain Charles Bouton, qui publia en 1901 un article dans *The Annals of Mathematics* intitulé « *Nim*, a game with a complete mathematical theory » (*Nim*, un jeu avec une théorie mathématique complète). Pour la première fois, ce jeu combinatoire impartial, c'est-à-dire où le hasard n'intervient pas et où les mouvements possibles sont les mêmes pour les deux joueurs, était résolu non seulement dans un cas particulier (la configuration 9-5-12), mais aussi dans le cas général (avec un nombre quelconque de tas), le tout formalisé mathématiquement *(voir l'encadré page 82)*.

Depuis, l'article de Bouton est considéré comme l'élément déclencheur de la théorie mathématique des jeux combinatoires. Il constitue le point de départ de multiples recherches consacrées à la résolution de jeux de plus en plus compliqués avec des avancées toujours plus spectaculaires, comme la résolution du jeu de Dames anglaises en 2007 par l'équipe canadienne de Jonathan Schaeffer. Lorsque Bouton s'est intéressé au jeu de *Nim*, celui-ci existait déjà depuis plusieurs siècles sous diverses formes parfois assez éloignées. Présenté aux XVI^e et XVII^e siècles dans les premiers ouvrages de récréations mathématiques – des recueils qui rassemblent, aujourd'hui encore, des problèmes mathématiques amusants et leur solution – ou pratiqué dans des villages d'Afrique de l'Ouest, ce jeu était l'apanage d'une élite.



Bibliothèque universitaire de Bologne

1. L'EFFET XXXIIII DE L'OUVRAGE *DE VIRIBUS QUANTITATIS* du mathématicien Fra Luca Pacioli (1508). Le moine italien y énonce une version du jeu de *Nim* – la plus ancienne variante européenne connue à ce jour : « Finir [le jeu] avant son compagnon quel que soit le nombre, et sans prendre plus qu'un nombre limité. » Il explique ensuite que ce jeu fait partie des jeux mathématiques amusants, honnêtes et ingénieux qui ont toute leur place dans les cours et auxquels tout le monde peut s'adonner comme récréation mathématique.

Une recette pour gagner à tous les coups

C'est dans l'ouvrage *De viribus quantitatis* du moine franciscain italien Fra Luca Pacioli publié en 1508, un des premiers recueils de récréations mathématiques, qu'apparaît l'ancêtre européen le plus ancien connu à ce jour du jeu de *Nim*. Dans l'effet XXXIIII, Pacioli confronte le lecteur au problème suivant : « Finir [le jeu] avant son compagnon, quel que soit le nombre, et sans prendre plus qu'un nombre limité. » Cet énoncé sibyllin prend tout son sens dans la résolution que donne ensuite Pacioli : il propose à deux personnes d'atteindre le nombre 30 en additionnant à tour de rôle des chiffres compris entre 1 et 6.

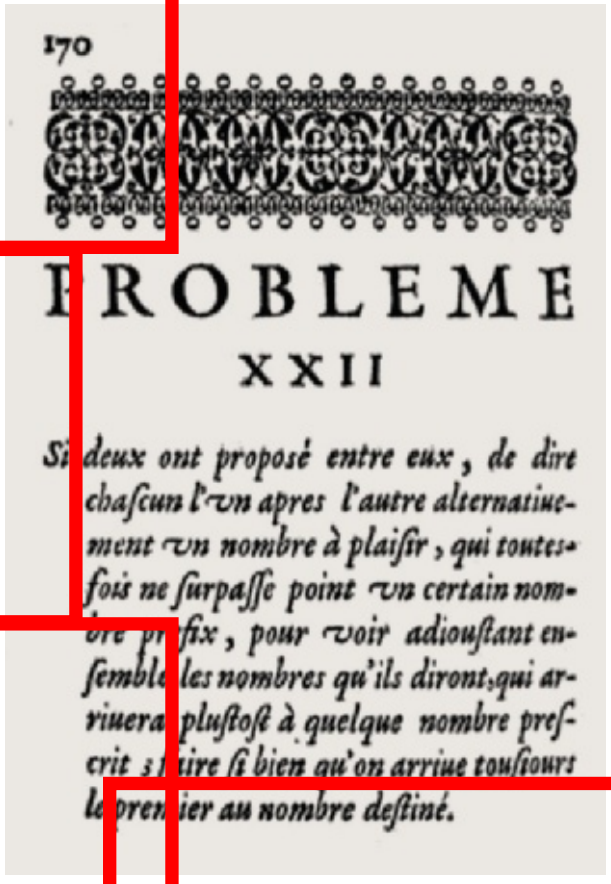
Il s'agit ici d'une version simplifiée du jeu de *Nim* correspondant au cas à un seul tas contenant 30 objets dont on ne peut prélever plus de 6 éléments par tour. Le jeu est énoncé sous une forme additive, où l'on ajoute des chiffres au lieu de diminuer des

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

tas. Pour gagner, explique Pacioli, il faut atteindre des paliers que l'on détermine par le raisonnement rétrograde suivant : si je ne veux pas que mon adversaire gagne, je dois lui proposer le plus grand nombre tel qu'en lui ajoutant 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 il ne puisse atteindre 30. Ce nombre est 23. En effet, quel que soit le chiffre qu'il ajoute à 23, il obtiendra un nombre supérieur ou égal à 24, mais inférieur ou égal à 29. Je pourrai alors compléter la somme jusqu'à 30 au tour suivant. En raisonnant de la même façon avec 23, on trouve que le nouveau palier de sûreté est 16, puis 9, puis 2. Ainsi, selon qui entame la partie, je dois m'arranger pour atteindre le premier un de ces paliers, puis les autres, et ce jusqu'à 30.

L'ouvrage de Pacioli est une collection de jeux ou récréations mathématiques de ce type, où l'auteur souhaite enseigner les mathématiques en évitant la lassitude d'exercices répétés. C'est le premier ouvrage entièrement consacré à des jeux et récréations. Avant Pacioli, ces problèmes étaient introduits occasionnellement dans les ouvrages mathématiques, à titre de passe pédagogique.

En 1612, le premier recueil imprimé de récréations mathématiques est publié sous le titre *Problèmes plaisants et délectables, qui se font par les nombres*. Il est l'œuvre du mathématicien et traducteur français Claude-Gaspard Bachet de Méziriac, qui sera aussi connu quelques années plus tard pour sa publication du texte grec de l'*Arithmétique* de Diophante (IIIe siècle), accompagné d'une traduction latine. Bachet participe en effet d'un vaste mouvement de transmission des œuvres des Anciens qui a débuté en 1480 et est destiné à rendre plus accessibles les textes des mathématiciens grecs. Le problème XXII de son recueil de récréations mathématiques propose une version du jeu de *Nim* similaire à celle énoncée par Pacioli.



170

PROBLEME

XXII

Si deux ont proposé entre eux, de dire chascun l'vn apres l'autre alternatiuement vn nombre à plaisir, qui toutesfois ne surpasse point vn certain nombre prefix, pour voir adioustant ensemble les nombres qu'ils diront, qui arriuera plustost à quelque nombre prescrit à plaire si bien qu'on arriue touſiours le premier au nombre destiné.

2. LE PROBLÈME XXII des *Problèmes plaisants et délectables* du mathématicien français Claude-Gaspard Bachet de Méziriac, ici dans l'édition de 1624, présente une version en français du jeu de *Nim* similaire à celle de Pacioli.

Bachet considère le cas où les deux personnes doivent atteindre 100 en sommant à tour de rôle des nombres compris entre 1 et 10. Il donne les positions qu'il faut obtenir pour être sûr de gagner, en prenant soin d'expliquer la règle – « infaillible et parfaitement démontrée » – à appliquer pour les obtenir. Néanmoins, il reconnaît que « ce n'est pas règle générale, car si l'on changeait le nombre destiné, à savoir 100, ou le nombre qu'on ne peut passer, à savoir 10, la chose pourrait aller autrement ». Ce qu'il montre en donnant d'autres exemples avec 120 ou en ne prenant que des nombres compris entre 1 et 9.

On voit déjà apparaître la notion de stratégie optimale qui assure une victoire certaine au joueur initié. Bachet conseille même, face à un adversaire ignorant « la finesse du jeu », de brouiller les pistes en ne cherchant pas systématiquement les paliers de sûreté « et ne pas prendre toujours tous les nombres remarquables et nécessaires, pour gagner infailliblement, car faisant ainsi tu découvrirais trop l'artifice, et s'il est homme de bon esprit il remarquera tout incontinent ces nombres-là, voyant que tu choisis toujours les mêmes, mais au commencement tu peux dire à la volée des autres nombres, jusques à ce que tu approches du nombre destiné, car alors tu pourras subtilement accrocher quelqu'un des nombres nécessaires de peur d'être surpris. » À bon entendeur…

Ces conseils sont révélateurs du cadre dans lequel se pratiquent les récréations mathématiques de l'époque. Bachet a précisé, dans le titre de son ouvrage, que ses problèmes plaisants seront « très utiles pour toute sorte de personnes curieuses qui se servent d'arithmétique ». De façon générale, les récréations mathématiques s'adressent à un nombre restreint de personnes, à des élites intellectuelles curieuses et ayant les moyens financiers de se procurer les ouvrages qui s'intéressent à des problèmes mathématiques ludiques, mais instructifs.

L'astuce du cavalier

De nombreux ouvrages dans la veine des *Problèmes plaisants et délectables* de Bachet se succèdent tout au long des XVIIe et XVIIIe siècles (notamment après la publication, en 1624, de la *Récréation mathématique* du Jésuite Jean Leurechon, maintes fois reprise et enrichie) et propagent en Europe la version additive du jeu de *Nim*. On la retrouve notamment en 1749 dans *Les amusements mathématiques* du Lillois André-Jo… problème intitulé *Le piquet des cavaliers*.

Nehmen, nimm, Nim !

Pourquoi le nom *Nim* ? Un lien avec le jeu d'origine chinoise *Fan-Tan* est souvent invoqué, mais à tort, le *Fan-Tan* étant un jeu où intervient le hasard. Selon le mathématicien Alan Ross, qui publia à ce sujet une courte note dans la *Mathematical Gazette* de mai 1953, l'explication la plus probable serait que *Nim* provienne de l'impératif *nimm* du verbe allemand *nehmen* qui signifie prendre ; Bouton aurait choisi ce nom en souvenir de ses années d'études à Leipzig où il a obtenu son doctorat. Dans le numéro de décembre 1953, Joseph Walsh, élève puis collègue de Bouton à l'Université Harvard, confirma l'origine allemande du mot *Nim*, le verbe prendre étant fréquemment employé durant une partie de jeu.

Plus romancé, l'énoncé met en scène deux amis voyageant à cheval. « L'un propose à l'autre un cent de piquet sans cartes [dans ce jeu de cartes, les joueurs amassent des points en fonction de leur main, et le premier qui a 100 points a gagné]. Ils conviennent : 1°. Celui qui arrivera le premier à 100 sera défrayé de souper, 2°. Qu'ils ne pourront prendre alternativement plus de 10 à la fois. » Rapskousky explique ensuite brièvement la stratégie à adopter pour tranquillement poser les pieds sous la table sans être de corvée d'épluchage…

Le *Tiouk-Tiouk* africain : un *Nim* déguisé

Dans un tout autre contexte historique et géographique, le *Tiouk-Tiouk*, un jeu de quadrillage africain, se ramène simplement à une configuration du *Nim* de Bouton. Ce jeu a été répertorié en 1955 par Charles Bréart, directeur d'école en Afrique tropicale, dans un ouvrage intitulé *Jeux et jouets de l'Ouest africain*. Il est décrit dans un chapitre consacré aux jeux de combinaisons à deux joueurs et sans hasard, à savoir les jeux de quadrillages (échecs, dames, morpions), les jeux à 12 cases (awélé) et autres variantes.

Le contexte social dans lequel se joue le *Tiouk-Tiouk* ne paraît pas si éloigné de celui de l'Europe au XVI[e] siècle : « Il existe en Afrique des formes de jeux à quadrillages très difficiles, qui furent longtemps permises seulement à certaines classes privilégiées et pour lesquelles les familles conservent, secrètes, des méthodes traditionnelles permettant d'écraser l'adversaire dès les premiers coups s'il ne possède pas lui même les vieilles méthodes traditionnelles de défense et des moyens de reprendre l'offensive. » Une fois encore, les clés de la résolution d'un jeu et des stratégies gagnantes sont détenues par une société minoritaire privilégiée qui profite de ses savoirs pour dominer « une population subjuguée ». Les jeux de quadrillage, sérieux par excellence, sont souvent réservés aux hommes adultes, voire aux chefs qui détiennent les stratégies gagnantes et affirment ainsi leur supériorité. C'est le cas du *Tiouk-Tiouk*, qui se présente comme un jeu de quadrillage bien que l'objectif ne soit pas de capturer les pions de son adversaire, mais de les bloquer *(voir l'encadré page ci-contre)*.

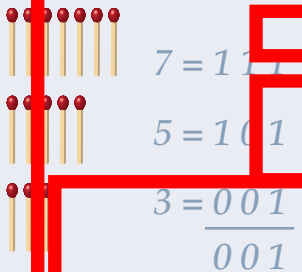
La partie se joue sur un damier carré composé d'un nombre pair de rangées dessiné dans le sable, où sont placées de part et d'autre une rangée avec des bâtonnets et une autre avec des graines. Chaque joueur se voit attribuer une rangée, donc un type d'objets, et peut déplacer ses pions un à la fois, en avant ou en arrière à volonté, et d'autant de cases qu'il lui plaît, mais ne peut pas sauter par-dessus le pion d'un partenaire. A gagné qui arrive à bloquer tous les pions du partenaire.

Le jeu de *Nim* selon Bouton

Le jeu décrit par Bouton oppose deux joueurs, autour d'une table sur laquelle sont placées trois piles d'objets de toutes sortes (nous prendrons ici des allumettes), le nombre d'objets dans chaque pile étant arbitraire et différent au commencement du jeu. À son tour, chaque joueur sélectionne une pile et retire autant d'objets qu'il veut : un, deux,… ou la pile entière. Le gagnant est celui qui prend le(s) dernier(s) jeton(s).

Bouton donne ensuite une méthode pour déterminer la nature de la configuration juste après qu'on a joué : gagnante ou perdante. Grâce à deux théorèmes, il montre que si on laisse une position gagnante à l'adversaire, celui-ci ne peut qu'engendrer une position perdante, mais qu'à partir de cette position perdante on peut atteindre une position gagnante. Ainsi, une position gagnante laissée à l'adversaire peut conduire à la victoire (à condition de réfléchir un peu !).

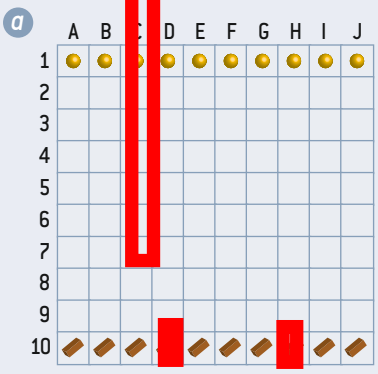
Pour savoir si une configuration est gagnante, il faut écrire les nombres de jetons de chaque pile en binaire (base 2), c'est-à-dire sous la forme d'une somme de puissances de 2 (les coefficients de cette somme constituent le nombre binaire recherché). Si la somme est nulle (sachant qu'en binaire 1 + 1 = 0), alors la position est gagnante.

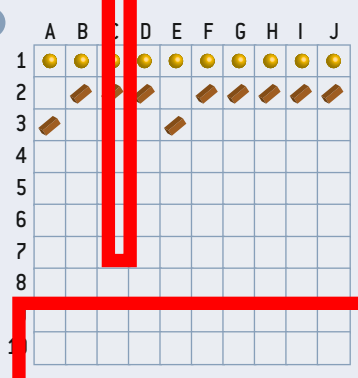


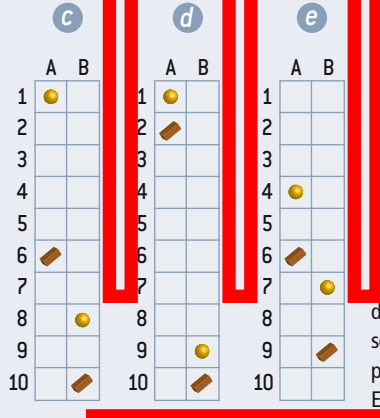
La somme en binaire des nombres d'allumettes constituant chaque tas (ici 7, 5, 3) est non nulle. D'après Bouton, la position est perdante. Il vous est donc possible, par une diminution adéquate, d'atteindre une position gagnante…

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Les règles du *Tiouk-Tiouk*







Le *Tiouk-Tiouk* (du mot d'argot peul *t'uk t'uk* qui signifie baiser) se joue à deux avec des bâtonnets et des graines qui constituent les pions respectifs des joueurs, sur un damier carré dessiné dans le sable. La configuration de départ est toujours la même *(a)*. À tour de rôle, chaque joueur déplace un pion dans sa colonne en avant ou en arrière et d'autant de cases qu'il lui plaît, mais ne peut sauter par-dessus le pion adverse. Le vainqueur est celui qui arrive à bloquer tous les pions de son adversaire. Sur les exemples *b* à *e*, c'est au tour du joueur aux bâtonnets. En *b*, même s'il semble sur le point de gagner, il ne peut que perdre. En *c*, il gagnera s'il pose son bâtonnet en B8 ; il perd, car son adversaire déplace sa pièce de B8 à B9 *(d)*. En *e*, il perd aussi, car il est obligé de rompre l'égalité des écarts entre les objets adverses.

Malgré ses apparentes différences (deux types d'objets – un par joueur –, placés non pas en tas mais alignés sur un plateau), le *Tiouk-Tiouk* n'est autre qu'une configuration de *Nim* : celle ayant un nombre pair de tas contenant chacune le même nombre d'objets. Chaque colonne du damier où se font face un bâtonnet et une graine équivaut à un tas du jeu de *Nim*, et l'écart entre les deux objets correspond au nombre initial d'allumettes. Bâtonnets et graines étant respectivement alignés au départ, cet écart – et donc le nombre d'allumettes correspondant – est identique sur toutes les colonnes au début du jeu.

La configuration initiale correspond à une position gagnante du jeu de *Nim*, ce que l'on retrouve immédiatement par la méthode de Bouton *(voir l'encadré page ci-contre)*. Bréart explique cette « position de sûreté » en parlant d'équilibre des distances entre les bâtonnets et les graines (aucun rapprochement avec le *Nim* de Bouton n'est mentionné). Le premier joueur est ainsi voué à perdre, conclut Bréart : il suffit au second joueur de rétablir à chaque coup l'équilibre des distances pour gagner la partie…

Aujourd'hui, le jeu de *Nim* est devenu un objet mathématique à part entière. En 1935 et en 1939, l'Allemand Roland Sprague et l'Américain Patrick Grundy ont publié indépendamment une méthode de résolution de tous les jeux impartiaux, fondée sur le jeu de *Nim* et inspirée des réflexions de Bouton et de ses successeurs. Leur théorème, dit de Sprague-Grundy, stipule que chaque position d'un jeu impartial fini se ramène à un jeu de *Nim* à un tas. La structure cachée des jeux impartiaux serait-elle apparue si le jeu de *Nim* n'avait été décliné sous diverses variantes au fil des siècles ? ■

L'AUTEUR

Lisa ROUGETET est doctorante en histoire des mathématiques à l'Université de Lille, au sein du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye, **Stratégies magiques au pays de *Nim***, *Pour la Science*, n° 377, pp. 88-93, mars 2009.

J.-P. Delahaye, **La fin des Dames anglaises ?**, *Pour la Science*, n° 363, pp. 90-95, juillet 2008.

D. Singmaster, ***De Viribus Quantitatis* by Luca Pacioli : the First Recreational Mathematics Book**, dans E. D. Demaine *et al.*, **A Lifetime of Puzzles**, AK Peters, pp. 77-122, 2008.

C. L. Bouton, ***Nim*, a game with a complete mathematical theory**, *The Annals of Mathematics*, vol. 3, n° 1, pp. 35-39, 1901-1902.

La sélection de livres

POUR LA

SCIENCE

Au programme des nouveautés de la rentrée, *Pour la Science* vous suggère de feuilleter le nouvel essai d'Hervé This pour découvrir un nouvel allié culinaire, le « composé pur » ; de réviser votre histoire de la physique ; de vous aventurer dans des intrigues mathématiques… Bonne rentrée !

La cuisine note à note

Hervé This

Nouveauté

Qu'est-ce que la «cuisine note à note» ? La réalisation de mets à partir de composés purs, mélangés habilement. À côté des épices traditionnelles, ces composés enrichissent les étagères de la cuisine ! À la clé, des goûts nouveaux et une infinité de possibles pour des cuisiniers créatifs. Nos fruits, légumes, viandes et poissons céderont-ils la place à des composés purs ?

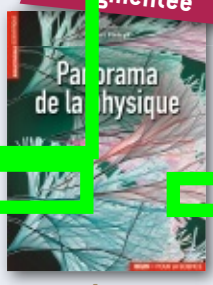
Réf. 006419

Editions Belin 2012
208 pages – 19,90 euros - ISBN 978-2-7011-6419-3

Panorama de la physique

Sous la direction de Gilbert Pietryk

Nouvelle édition augmentée



Des années 1950 jusqu'aux résultats les plus récents, ce livre dresse un panorama de la physique à travers 160 sujets, chacun traité sur une double page illustrée. Un ouvrage pour entrainer le lecteur à cœur de la science en marche, lui donner les bases pour comprendre et le goût de suivre l'actualité scientifique.

Editions Belin / Pour la Science 2012
320 pages - 28,50 euros - ISBN 978-2-7011-6500-4

Réf. 006500

Vive l'agro-révolution française !

Vincent Tardieu

Nouveauté

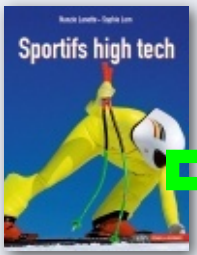
Alors que la Terre comptera 9 milliards de bouches à nourrir en 2050, nombreux sont ceux qui pensent qu'il n'y a pas d'alternative à l'agriculture chimique et industrielle. Et pourtant… Oui, on peut nourrir la planète tout en préservant l'environnement ! Oui, nos paysans peuvent vivre mieux et plus nombreux !

Editions Belin / Pour la Science 2012
464 pages - 22,00 euros - ISBN 978-2-7011-5973-7

Réf. 005973

Sportifs high tech

Nunzio Lacotte, Sophie Lem



Une victoire olympique est désormais à la fois une affaire de sport, de technologie et de finances. Aucune technologie, fut-elle la plus avancée, ne peut remplacer le talent du sportif, l'intelligence de l'entraîneur et les heures d'entraînement. Cependant, gagner une médaille d'or sans l'aide des technologies n'est plus possible !

Réf. 005966

Editions Belin / Pour la Science 2012
160 pages - 23,00 euros – ISBN 978-2-7011-5966-9

La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'incomplétude de Gödel et l'indécidabilité de Turing ; la troublante loi de Benford ; les étranges hyper-ensembles etc. Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux intrigués par le monde abstrait des raisonnements.

Réf. 075115

Editions Belin / Pour la Science 2012
200 pages - 27,00 euros - ISBN 978-2-8424-5115-8

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 177 — Le Pommier

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

L'Assassin des échecs et autres fictions mathématiques

Benoît Rittaud

Réf. 0906[illegible]5 *

De péripéties géométriques en rebondissements numériques, d'intrigues probabilistes en paradoxes logiques, embarquez pour une contrée enchanter[illegible]sse. Pour que le récit garde son mordant, les subtilités mathématiques sont décryptées après chacune des 13 nouvelles pour qui veut en savoir plus !

Editions Le Po[illegible]
240 pages - 1[illegible]0 euros – ISBN 978-2-7465-0635-0

Nouvelle collection

Petits meurtres entre mathématiciens

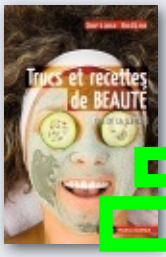
Tefcros Michaelides

Réf. 090641 *

Sur fond de thriller (la conclusion de l'ouvrage ne pourra que vous surprendre !), Tefcros Michaelides vous projette dans les coulisses du monde mathématique du début du XX[e] siècle, suivant les traces de Russell, Hilbert, Poincaré et Gödel.

Editions Le Pommier 2012
288 pages - 17,00 euros – ISBN 978-2-7465-0641-1

Trucs et recettes de beauté : que dit la science ?



Elisa Frisaldi, Valentina Murelli, Donato Ramani

Réf. 005693

Les produits de beauté à base d'extraits naturels sont à la mode. Mais sont-ils réellement efficaces ? Dix plantes parmi celles couramment employées (thé vert, raisin [illegible]) font l'objet d'une enquête d'experts, qui s'attachent à distinguer les effets scientifiquement démontrés [illegible]

Editions Belin / Pour la Science 2012
160 pages - 18[illegible]0 euros – ISBN 978-2-7011-5693-4

La SF sous les feux de la science

Roland Lehoucq, préface de Claudie Ecken

Réf. 090619 *

L'auteur analyse les grands thèmes de la science-fiction grâce aux outils de la science et tente de répondre à toutes les questions que posent ces [illegible]tions extraordinaires : le téléporteur de Star Trek est-il pour bientôt ? Pourra-t-on disposer du blaster de Star Wars ?

216 pages - 20,00 euros – ISBN 978-2-7465-0619-0

Pour commander ces ouvrages

renvoyez le bon de commande ci-dessous

ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie

(sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr)

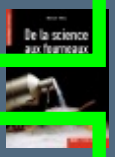
LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE C'EST AUSSI

Les secrets de la casserole

Hervé This

Editions Belin 2008
232 pages - 21,35 euros
ISBN 978-2-70[illegible]
Réf. 004974

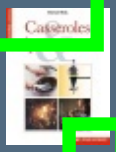
De la science aux fourneaux



Hervé This

Editions Belin [illegible]
2007
168 pages - 26,40 euros
ISBN 978-2-84[illegible]
Réf. 075087

Casseroles & éprouvettes



Hervé This

Editions Belin [illegible]
2002
240 pages – 23,35 euros
ISBN 978-2-8424-5039-7
Réf. 075039

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 1350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ **Oui, je commande les livres présentés dans la sélection de *Pour la Science*.** Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,50 € France – 12 € étranger)	+	€
Total à régler	=	€

Offre valable jusqu'au 30/11/2012

Indiquez mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. :
Pays : Tél.* :
*facultatif
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
Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

DPL420

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Le Pommier

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 ❑.**

LOGIQUE & CALCUL

La suite de Stern-Brocot, sœur de Fibonacci

Si la définition de la suite diatomique de Stern est simple, sa structure est riche de propriétés. Elle est le nœud central d'un vaste réseau de relations dont on découvre chaque année des prolongements.

Jean-Paul DELAHAYE

Tout le monde connaît la suite de Leonardo Fibonacci, définie par : $f_0 = 0$; $f_1 = 1$; $f_{n+2} = f_n + f_{n+1}$. Chaque terme est la somme des deux précédents et le début de la suite est 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21... Elle apparaît dans des contextes variés et possède une multitude de propriétés remarquables, au point qu'une revue de mathématiques lui est entièrement dédiée : le *Fibonacci Quaterly,* journal officiel de la *Fibonacci Association* (http://www.fq.math.ca/).

Cette merveille arithmétique et combinatoire a une sœur, moins célèbre, mais aussi intéressante, la suite diatomique de Stern. Elle est connue aussi sous le nom de suite de Stern-Brocot ou fonction *fusc*. Comme la suite de Fibonacci, on la retrouve au centre d'un réseau infini de relations qui en font l'un des plus fascinants objets des mathématiques discrètes. Sa définition ressemble à celle de la suite de Fibonacci. La suite diatomique de Stern est le résultat des petites équations suivantes :

$s_0 = 0$; $s_1 = 1$; $s_{2n} = s_n$; $s_{2n+1} = s_n + s_{n+1}$.

Autrement dit, elle commence par 0, 1, puis, pour la connaître en m, si m est pair, on regarde sa valeur en $m/2$, et si m est impair, on coupe m en deux parties aussi égales que possible, on regarde les valeurs correspondantes et on additionne.

Moritz Stern (1807-1894)

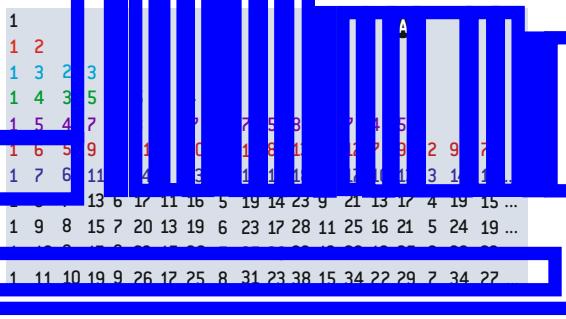
Le nom de la suite est celui du mathématicien Moritz Stern qui l'a mentionnée et étudiée dans un article de 1858. Stern était un élève de Gauss, à qui il succéda à la tête du département de mathématiques de Göttingen. Quant à Achille Brocot (1817-1878), il était horloger et s'intéressait aux fractions pour ses mouvements d'horloge. Depuis une dizaine d'années, la suite a fait l'objet d'une attention soutenue, conduisant à de nombreuses et jolies découvertes. L'adjectif diatomique provient de la formule $s_{2n+1} = s_n + s_{n+1}$, qui signifie que les termes pouvant ... de la suite naissent de la somme de deux termes, ou atomes, précédents.

Les premiers éléments de la suite sont indiqués au bas de la page. Elle semble complexe et impénétrable. Elle est bien sûr recensée dans l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane, sous le numéro A002487 (voir http://oeis.org/). Son graphe est un peu plus parlant *(voir l'encadré 1)* car on perçoit des régularités et même un aspect fractal : des formes semblables apparaissent à diverses échelles.

Dispositions en tableaux

Il existe plusieurs méthodes pour en disposer les termes qui aident à en dévoiler l'ordre secret. La première disposition graphique révélatrice, nommée *escalier tassé de Stern*, consiste à oublier le 0 du début et à faire des retours à la ligne après 1, 2, 4, 8 termes, etc. A

On remarque que la somme des éléments de la ligne A est exactement 3^n, ce qu'un peu de travail mathématique permet de



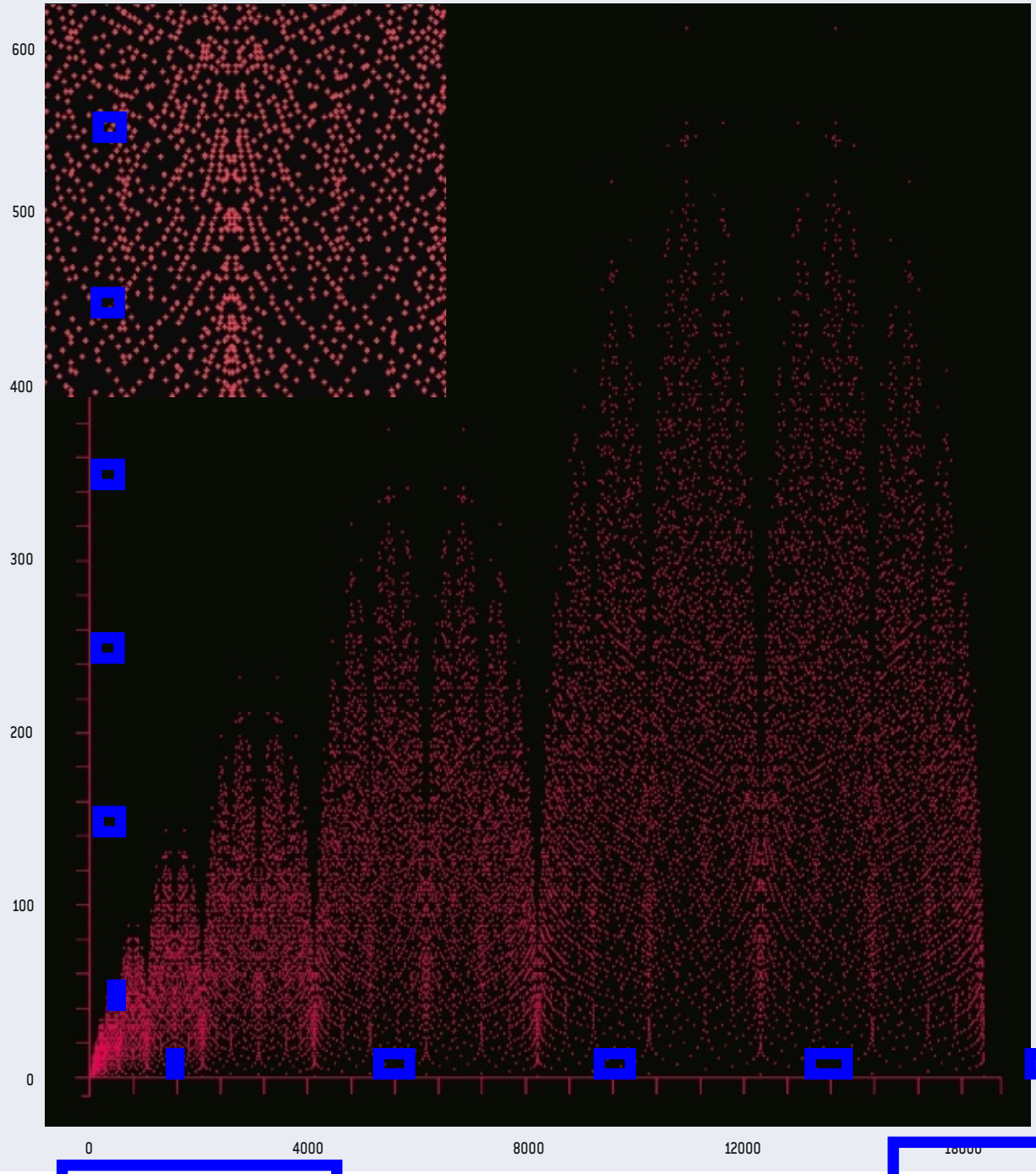
1, 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 4, 3, 5, 2, 5, 3, 4, 1, 5, 4, 7, 3, 8, 5, 7, 2, 7, 5, 8, 3, 7, 4, 5, 1, 6, 5, 9, 4, 11, 7, 10, 3, 11, 8, 13, 5, 12, 7,

9, 2, 9, 7, 12, 5, 13, 8, 11, 3, 10, 7, 11, 4, 9, 5, 6, 1, 7, 6, 11, 5, 14, 9, 13, 4, 15, 11, 18, 7, 17, 10, 13, 3, 14, 11, 19, 8, 21,

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

1. Les premiers éléments de la suite de Stern-Brocot

Dans ce [illegible] premiers éléments de la suite diatomique de Stern-Brocot, on porte en abscisse le numéro de chaque élément dans la suite et en ordonnée sa valeur. On voit apparaître des structures à plusieurs échelles, comme c'est le cas pour les images fractales. Pourtant, la suite diatomique de Stern contient un ordre caché et même une simplicité inattendue. L'intérêt qu'on lui porte depuis quelques années le confirme spectaculairement.



démontrer. Toutes les propriétés que nous allons mentionner ont été démontrées (voir par exemple l'article de Sam Northshield indiqué dans la bibliographie). Ces démonstrations ne présentent pas de difficultés exceptionnelles : dans ce domaine, lorsqu'une propriété comme celle des puissances de 3 est identifiée, la prouver n'est qu'une affaire d'effort et de patience que la communauté mathématique est presque certaine de voir aboutir. Le jeu de la recherche dans l'étude d'une telle suite se situe bien plus dans la découverte des propriétés que dans leur démonstration.

Une seconde propriété tout à fait remarquable du *Tableau tassé de Stern* est que chaque colonne est une suite arithmétique, c'est-à-dire dont la différence entre deux termes consécutifs est constante. La quatrième colonne est par exemple la suite arithmétique 3, 5, 7, 9, 11, 13,... c'est-à-dire celle de tous les nombres impairs. La raison (différence entre deux termes consécutifs) de la suite arithmétique de la colonne 0 est 0 ; celle de la colonne 1 est 1 ; ensuite viennent les raisons 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 4, 3, 5, ... suite que vous reconnaissez (la suite de Stern). N'est-ce pas amusant et miraculeux ?

Le tableau précédent se dispose aussi en étalant les nombres de chaque ligne et en ajoutant un 1 (en rouge) au bout de chacune, ce qui conduit à l'arbre diatomique de Stern **B**.

Des liens avec le triangle de Pascal

Chaque ligne est un palindrome, ce qui est une propriété intéressante... qui a été démontrée. Quand la suite est ainsi disposée, bien d'autres relations apparaissent. Cet arbre diatomique de Stern se construit indépendamment des formules données plus haut, en utilisant un procédé proche de celui qui conduit au fameux triangle de Pascal. Rappelons que pour le triangle de Pascal **C**, chaque élément est la somme de ses deux voisins sur la ligne au-dessus (par exemple, 35 est le résultat de 15 + 20). On peut le disposer en triangle rectangle ou isocèle.

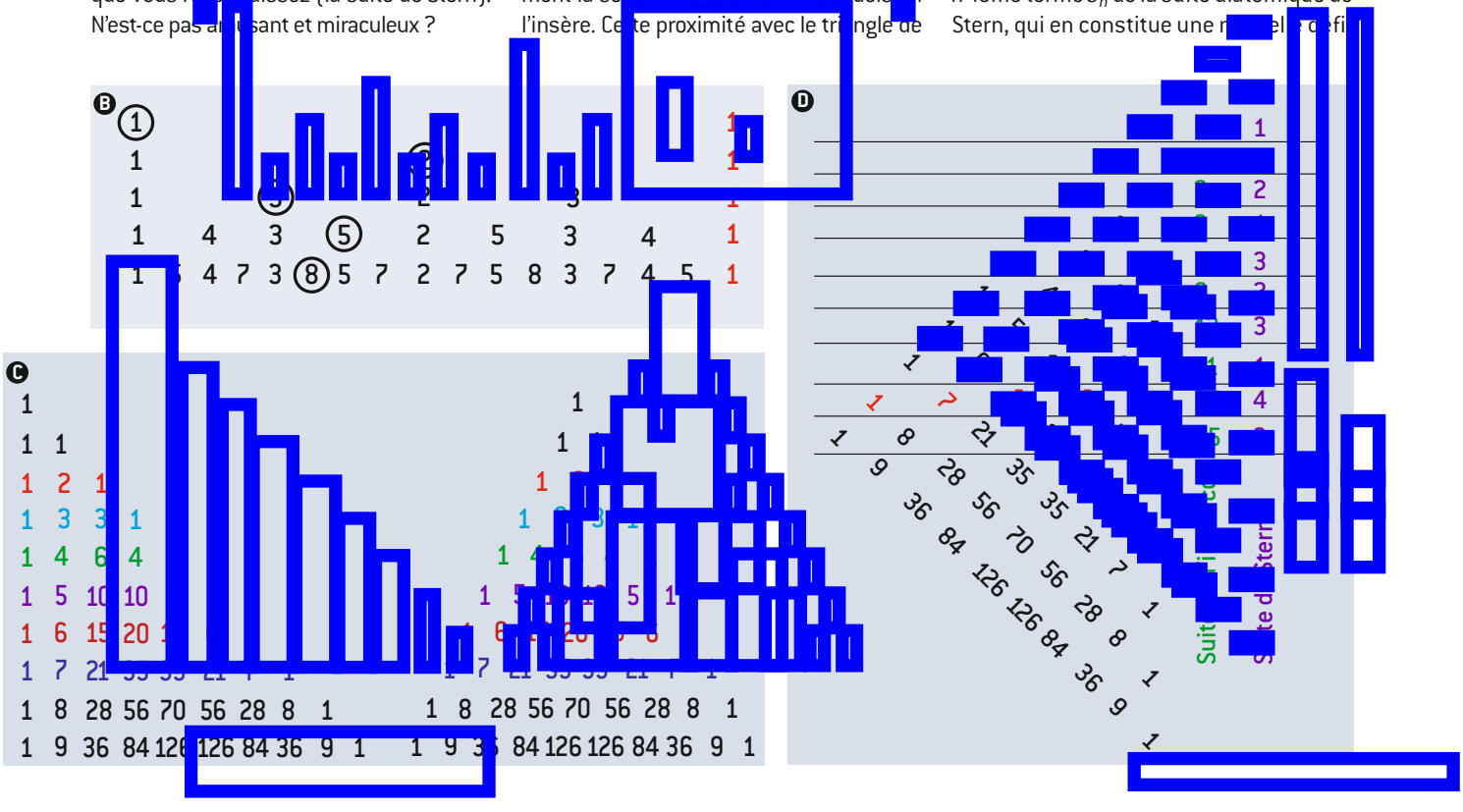
Dans l'arbre diatomique de Stern, chaque ligne nouvelle est obtenue en recopiant la ligne précédente et en insérant un nouvel entier entre chaque nombre qui est simplement la somme de ceux entre lesquels on l'insère. Cette proximité avec le triangle de Pascal se manifeste de multiples façons, et les trois structures du triangle de Pascal, de la suite de Fibonacci et de la suite diatomique de Stern entretiennent de solides relations « amicales ». Voici quatre de ces étonnants liens entre joyaux des mathématiques discrètes.

1) Les maximums des lignes du tableau tassé de Stern (ou, ce qui revient au même, de l'arbre diatomique de Stern) sont exactement les termes de la suite de Fibonacci 1, 2, 3, 5, 8, 13, ... On les a encerclés **B**.

2) En faisant la somme des coefficients du triangle de Pascal situés sur les obliques montantes (l'une d'elles est dessinée en rouge, **C**), on obtient les termes de la suite de Fibonacci 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13,...

3) Si on compte le nombre de nombres impairs sur ces mêmes obliques montantes, on trouve exactement les termes de la suite diatomique de Stern, qui est donc cachée dans le triangle de Pascal comme l'est la suite de Fibonacci.

4) Cette dernière propriété conduit d'ailleurs à une formule explicite pour le n-ième terme s_n de la suite diatomique de Stern, qui en constitue une remarquable défi



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

2. Le graphe infini de la suite de Stern

Il existe deux interprétations graphiques assez simples de la suite diatomique de Stern. On considère le graphe (1) infini dessiné ci-dessous dont le principe de construction est immédiat. On peut le voir au choix :

– comme un point de départ qui donne lieu à deux branches formant des angles de 45°, qui eux-mêmes se séparent chacune en trois branches du même type, etc.

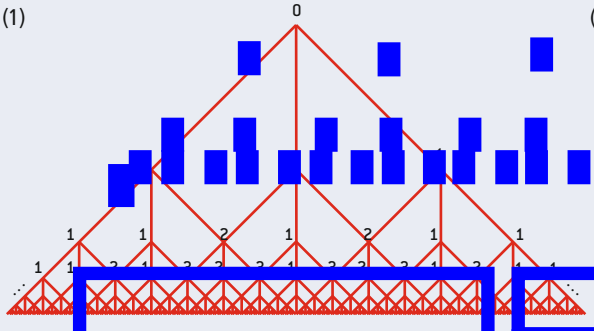
– comme un triangle rectangle isocèle rectangle par des trapèzes rectangles tous semblables et de plus en plus petits.

La suite diatomique de Stern y est cachée. En comptant le nombre de chemins descendants permettant d'atteindre un nœud du graphe, on découvre (et l'on démontre) que chaque ligne lue jusqu'à la moitié est le début de la ligne suivante (à l'exception du 0) et donc que la ligne n du graphe indique 2^n termes de la série.

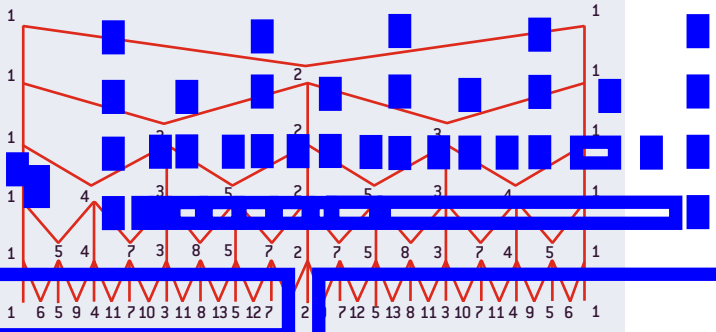
Le graphe (2), l'arbre diatomique de Stern, possède une propriété du même type, sauf que cette fois la suite de Stern s'obtient simplement en écrivant les nombres de chemins descendants associés aux nœuds. On peut aussi, pour obtenir une nouvelle ligne à partir de la précédente, recopier la ligne dont on part (en ayant éliminé les extrémités) et insérer entre chaque paire d'éléments consécutifs (a, b) la somme $a + b$.

Un autre graphe infini, que nous laissons au lecteur le soin de [illegible], les coefficients du triangle de Pascal par ce procédé de décompte des chemins descendants.

(1)



(2)



nition à partir des coefficients du binôme de Newton (les éléments du triangle de Pascal) :

$$s_n = \sum_{j=n-1}^{2n} \left(\binom{i+j}{i} \bmod 2 \right)$$

De nombreux et remarquables liens existent aussi entre la suite diatomique de Stern et le système de numération binaire. Nous allons en détailler trois qui attestent à nouveau qu'en ces domaines des mathématiques discrètes, « Tout est dans tout » et qu'un étroit et serré système de relations fait passer rapidement d'une structure à une autre… pour qui sait ouvrir les yeux.

La numération binaire

La valeur de s_n est exactement le nombre de représentations de $n - 1$ en notation binaire généralisée, c'est-à-dire comme somme de puissances de 2 prises 0, 1 ou 2 fois (la notation binaire est la représentation de n en somme de puissances de 2, prises chacune 0 ou 1 fois). Expliquons cela.

Le nombre 8 (= 9 – 1) peut s'écrire de quatre façons en notation binaire généralisée :

a) $8 = 2^3$, qui donne la notation binaire 1000_2 (le 2 en indice est là pour éviter la confusion entre notations binaires et décimales) ;

b) $8 = 2^2 + 4$, qui donne la notation binaire généralisée 200_2 ;

c) $8 = 2^2 + 2 + 2$, qui donne 120_2 ;

d) $8 = 2^2 + 1 + 1 + 1 + 1$, qui donne 112_2.

Qu'il y ait quatre façons d'écrire $8 = 9 - 1$ en notation binaire généralisée signifie que $s_9 = 4$.

Dans son merveilleux livre, publié en 2003 et entièrement consacré aux constantes mathématiques, Steven Finch note que la valeur de s_n est aussi le nombre de façons d'extraire de l'écriture binaire de n une suite alternée de 1 et de 0 commençant et se terminant par 1.

Prenons l'exemple du nombre 17, qui s'écrit 10001 en base 2. On peut extraire de cette notation cinq sous-suites alternées (en rouge) commençant et finissant par 1 : 10001 10001 10001 10001 10001. On en déduit $s_{17} = 5$.

Un autre lien extraordinaire entre la base de numération 2 et la suite diatomique de Stern est celui qui permet, à partir de n écrit en binaire, d'avoir immédiatement s_n. Partant de n, par exemple 98, on l'écrit en base 2 : 1100010_2. On compte le nombre de 1 qui commencent la suite 1100010_2, il y en a 2 : $a_0 = 2$; on compte le nombre de 0 qui suivent, $a_1 = 3$; puis le nombre de 1 qui suivent, $a_2 = 1$; puis le nombre de 0 qui suivent, $a_3 = 1$, puis enfin le nombre de 1 qui suivent, $a_4 = 0$. On considère alors la fraction :

$$a_4 + \cfrac{1}{a_3 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_0}}}} = 0 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{3 + \cfrac{1}{2}}} = \frac{9}{16}$$

Cette fraction permet d'affirmer que la valeur de s_{98} est 9, le numérateur. En prime, le terme suivant est le dénominateur : $s_{99} = 16$. Pour un entier n quelconque, on écrit n sous forme binaire, et la fraction associée comme précédemment : son numérateur et son dénominateur sont les termes de rang n et $n + 1$ de la suite diatomique de Stern.

On vérifie qu'il en est bien ainsi, comme on l'a déjà dit, le procédé n'est pas

seulement constaté, mais dûment démontré. N'est-ce pas magique ?

L'énumération parfaite des nombres rationnels

Nous arrivons à la plus remarquable propriété de la suite diatomique de Stern, qui se rapporte à l'énumération des fractions. Les nombres fractionnaires ou plus communément nommés nombres rationnels sont les quotients de deux nombres entiers (comme 1/2, 5/1, 23/165...). En écrivant toutes les fractions positives dans un tableau à double entrée (une pour le numérateur, l'autre pour le dénominateur) et en parcourant successivement les diagonales montantes du tableau (sommes du numérateur et du dénominateur égales), on obtient une énumération des nombres rationnels **E**. Elle montre qu'ils ne sont pas « vraiment » plus nombreux que les nombres entiers (même infini dénombrable).

E

	1	2	3	4	5	6	7	...
1	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	...
2	2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	...
3	3/1	3/2	3/3	3/4	3/5	3/6	3/7	...
4	4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7	...
5	5/1	5/2	5/3	5/4	5/5	5/6	5/7	...
6	6/1	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	6/7	...
7	7/1	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	...

L'énumération commence par 1/1, 2/1, 1/2, 3/1, 2/2, 1/3, 4/1, 3/2, 2/3, 1/4, 5/1, 4/2, 3/3, 2/4, 1/5, ... Dans cette liste des fractions, du fait des simplifications possibles (2/2 = 1/1, 2/4=1/2, etc.), certains nombres rationnels sont répétés. Ce n'est pas très grave, car on peut reprendre l'énumération en décidant de ne pas garder les nombres qui se trouveront déjà mentionnés, c'est-à-dire ceux qui se simplifient. Le début de cette énumération sans répétition devient alors : 1/1, 2/1, 1/2, 3/1, 1/3, 4/1, 3/2, 2/3, 1/4, 5/1, 1/5,... Le résultat de ce nettoyage est une bijection entre les entiers positifs et les nombres rationnels positifs : à chaque nombre entier *n* positif, le *n*-ième nombre de l'énumération est un nombre rationnel simplifié (une fraction irréductible) et il n'y a ni oubli ni répétition.

Un défaut de cette méthode de mise en correspondance nombre à nombre, entre les entiers et les rationnels, est qu'il est impossible, à moins d'un assez gros travail, de reconnaître quel est le nombre rationnel qui vient par exemple en position mille (et est donc associé à 1 000). Il est encore plus difficile d'avoir une formule générale et simple donnant le *n*-ième terme de l'énumération.

Très étonnamment, la suite diatomique de Stern fournit une solution à ce problème : si on énumère les rationnels en prenant successivement : s_0/s_1, s_1/s_2, s_2/s_3, s_3/s_4, s_4/s_5, s_5/s_6, s_6/s_7, s_7/s_8, s_8/s_9, s_9/s_{10},... c'est-à-dire : 1/1, 1/2, 2/1, 1/3, 3/2, 2/3, 3/1, 1/4, 4/3, ..., alors la liste obtenue est parfaite. Il n'y a ni oubli, ni répétition, ni fractions simplifiables ; c'est une mise en ordre idéale de l'infinité des nombres rationnels.

Cette fois, on peut savoir sans mal que le *n*-ième élément énuméré est s_{n-1}/s_n, rapport dont on connaît rapidement la valeur à partir du développement binaire de *n* sans passer par les précédents ; voir plus haut l'exemple du calcul de s_{99}.

Cette merveilleuse liste des fractions a incité Stern en 1858 à introduire sa suite diatomique qui donne lieu à de jolies représentations graphiques de l'ensemble des nombres rationnels positifs. Partant de l'arbre diatomique de Stern (sans sa dernière colonne qui est en diagonale) chaque élément est par le suivant [illegible] puis en l'ajoutant à nouveau à ce

F

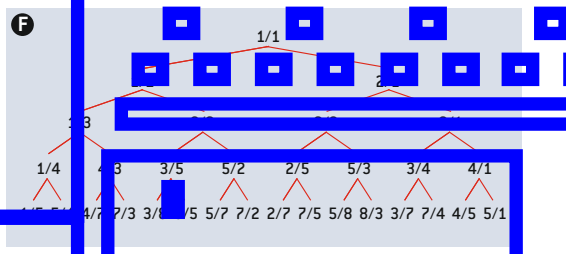


tableau infini de tous les nombres rationnels **G**. Ce tableau est parfois nommé arbre de Calting-Wilf, car Neil Calting et Herbert Wilf l'ont étudié en 200[illegible].

La représentation fractale de l'arbre binaire en fait apparaître un plus grand nombre d'éléments **G**.

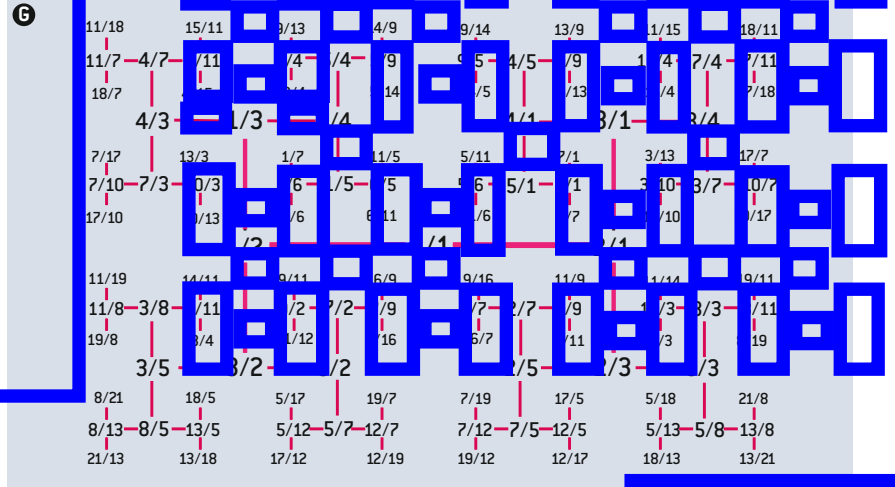
Plus intéressante encore, la disposition en spirale rend apparent à la fois l'arbre et l'énumération linéaire de tous les rationnels **H**.

L'arbre de Calting-Wilf possède une magnifique propriété qui suffit d'ailleurs à l'engendrer à partir de sa racine 1/1 : les deux descendants d'une fraction a/b de l'arbre sont dans l'ordre $a/(a+b)$ et $(a+b)/b$. Ce procédé étonnamment simple fournit indirectement une nouvelle méthode pour engendrer la suite diatomique de Stern.

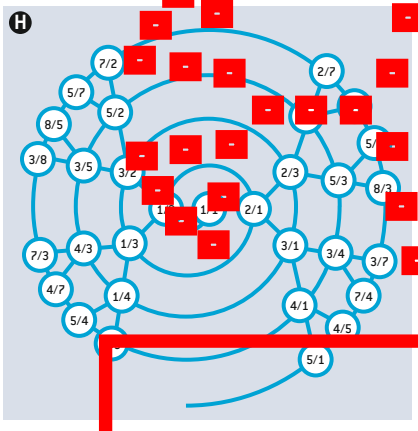
Une autre formule surprenante par sa simplicité permet directement de passer d'un élément de l'énumération magique des rationnels au suivant : $f(x) = 1/(1 + 2[x] - x)$ (où $[x]$ désigne la partie entière de x).

Autrement dit, en partant de 1/1 et en appliquant la fonction f, on obtient d'abord 2/1, puis en l'ajoutant à nouveau à ce

G



© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012



qu'on vient d'obtenir, on a 2/1, puis 1/3, 3/2, 2/3, 3/1, 1/4, 4/3, 3/5, 5/2, etc., ce qui énumère tous les nombres rationnels, chacun une fois et une seule, et sans jamais tomber sur des fractions simplifiables. [Contrôle : 1/1 → 1/[1+2[1]–1] = 1/2 → 1/[1+2[1/2]–1/2] = 2 → 1/[1+2[2]–2] = 1/3 → 1/[1+2[1/3]

Il est impossible ici de présenter toutes les propriétés de la suite diatomique de Stern-Brocot, pas plus que ses généralisations (avec des polynômes par exemple), tant la richesse de sa structure semble inépuisable.

Il est amusant qu'il ait fallu attendre le XXe et le plus souvent le XXIe siècle pour que se dévoile une telle marée de relations et de propriétés simples provenant de cette suite à la définition ridicule de banalité. Nous sommes parfois tentés, à tort, de croire que nous connaissons tout ce qui est simple et fondamental. Il reste sans doute encore de nombreuses vérités mathématiques élémentaires à découvrir, que mystérieusement nous ne voyons pas. C'est bien sûr une source de plaisir sans égale pour tout mathématicien ou amateur de nombres que de voir surgir cette simplicité inattendue qui est peut-être un autre

Solution de l'énigme cryptographique

Notre rubrique de juin 2012 portait sur la cryptographie visuelle. Elle proposait une énigme : un prénom de mathématicien était caché dans une image. Rafael Chevalier a été le premier à m'avoir fait parvenir la solution. Il gagne donc un abonnement d'un an à *Pour la Science*. Jean-François Colonna qui connaissait l'énigme avant la parution (et qui était donc hors concours) l'avait aussi résolue.

Il fallait trouver SRINIVASA, prénom du grand mathématicien indien Ramanujan, célèbre pour ses travaux en théorie des nombres et pour son extraordinaire aptitude au calcul. La méthode de chiffrage était fondée sur l'idée de la superposition de transparents expliquée dans l'article. Comme il n'y avait qu'une seule image, et que l'image était carrée, l'idée était assez naturelle de superposer un transparent de l'image avec le même transparent tourné de 90°, 180° ou 270°. C'est effectivement ce qu'il fallait faire, avec 180°.

L'énigme aurait été trop facile si cette seule rotation-superposition avait donné la solution. Il fallait donc aussi décaler le transparent tourné. Le nombre de cases du décalage horizontal et le nombre de cases du décalage vertical jouent le rôle de clefs de chiffrage. Cependant, une méthode exhaustive d'exploration n'était pas contre-indiquée à mettre en place et conduisait donc à la solution pour peu qu'on soit un peu patient.

La patience n'était pas absolument nécessaire car on pouvait se repérer visuellement sur les motifs présents sur les images pour découvrir sans trop de peine la bonne superposition. C'est d'ailleurs ainsi qu'a procédé R. Chevalier qui nous a expliqué avoir résolu l'énigme en environ une heure.

Nous avons indiqué ci-contre la solution que l'on aperçoit lorsque l'image initiale et sa copie tournée de 180° sont superposées et convenablement décalées l'une par rapport à l'autre.

L'AUTEUR

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

B. Bates *et al.*, **Child's addition in the Stern-Brocot tree**, *European Journal of Combinatorics*, vol. 33, pp. 148-167, 2012.

M. Coonsa et J. Shallit, **A pattern sequence approach to Stern's sequence**, *Discrete Mathematics*, vol. 311, pp. 2630-2633, 2011.

S. Glasby, **Enumerating the rationals from left to right**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 118, pp. 830-835, 2011.

S. Northshield, **Stern's diatomic sequence 0, 1, 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 4, ...**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 117, pp. 581-598, 2010.

B. Bates *et al.*, **Counting terms in the Stern-Brocot tree**, *European Journal of Combinatorics*, vol. 31, pp. 1020-1033, 2010.

S. Finch, **Mathematical Constants**, *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*, vol. 94, Cambridge University Press, 2003.

N. Calting et H. Wilf, **Recounting the rationals**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 107, pp. 360-363, 2000.

M. Stern, **Uber eine zahlentheoretische Funktion**, *J. Reine Angew Math.*, vol. 55, pp. 193-220, 1858.

SCIENCE & FICTION

Pourquoi tant de grosses têtes dans la science-fiction ?

Le volumineux cerveau de certains extraterrestres des films et autres romans d'anticipation intrigue les scientifiques.

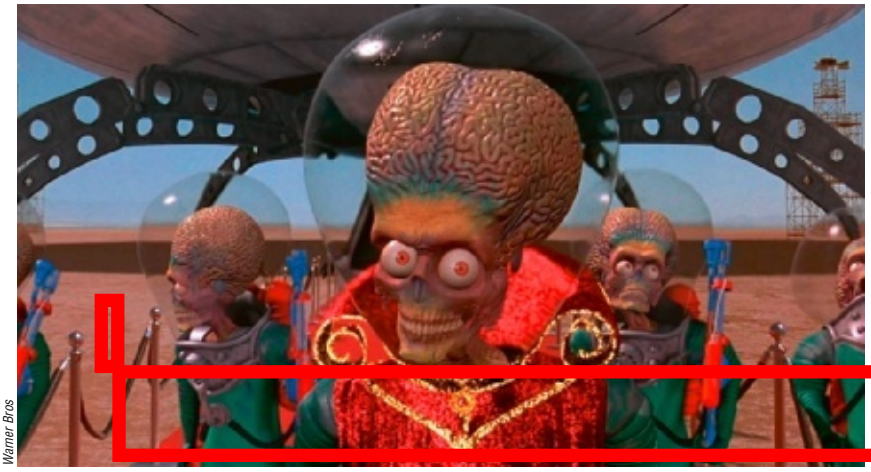
Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Les envahisseurs de *Mars Attacks !*, le film de Tim Burton (1996), sont affreux : grands et minces, au visage décharné et aux yeux globuleux, ces extraterrestres ont tous une tête démesurée, hypertrophiée *(voir la figure 1)*. Voilà un caractère qui n'est pas original pour un extraterrestre : des « petits gris » de l'affaire Roswell au *E.T.* de Steven Spielberg (1982), des aliens de *Star Trek* à ceux de *Star Wars*, les « grosses têtes » sont légion en science-fiction ! Mais de tels archétypes sont-ils biologiquement plausibles ? Un cerveau surdimensionné est-il vraiment plus intelligent ? Et demain, aurons-nous tous un encéphale démesuré ?

Observons de plus près ces Martiens de *Mars Attacks !* : curieusement, leur cerveau n'est protégé que par un ample casque transparent. Or, même en l'absence de prédateur, une espèce n'a aucun avantage adaptatif à être dotée d'un gros cerveau non protégé, car c'est le centre vital du traitement des informations. D'ailleurs, dans les océans terrestres, l'apparition de l'encéphale, chez des « poissons » sans mâchoire il y a 480 millions d'années environ, a été concomitante avec celle d'une boîte crânienne censée protéger le cerveau des agressions externes. Cette boîte est même une caractéristique importante définissant le groupe des *craniates*, qui réunit l'ensemble des vertébrés à nageoires et à pattes (les *tétrapodes* dont nous faisons partie).

La couche la plus externe du cerveau des Martiens, leur cortex, présente aussi de belles circonvolutions. Sur Terre, cette morphologie se retrouve plutôt chez des mammifères à grand cerveau tels les chiens, les baleines ou encore les grands singes. Les petits mammifères, rats ou souris par exemple, ainsi que d'autres tétrapodes tels que les grenouilles et les oiseaux ont, eux, des cerveaux plutôt lisses. Ces replis du cortex permettent une augmentation de la surface du cerveau dans le volume limité de la boîte crânienne. Parce qu'il est replié, le cortex humain, dont la surface est d'environ deux mètres carrés, tient dans un volume dont la surface interne est trois fois plus faible. Sans boîte crânienne, le cerveau des Martiens n'a pas à être soumis à cette contrainte géométrique : ses multiples replis sont une « erreur » de réalisateur !

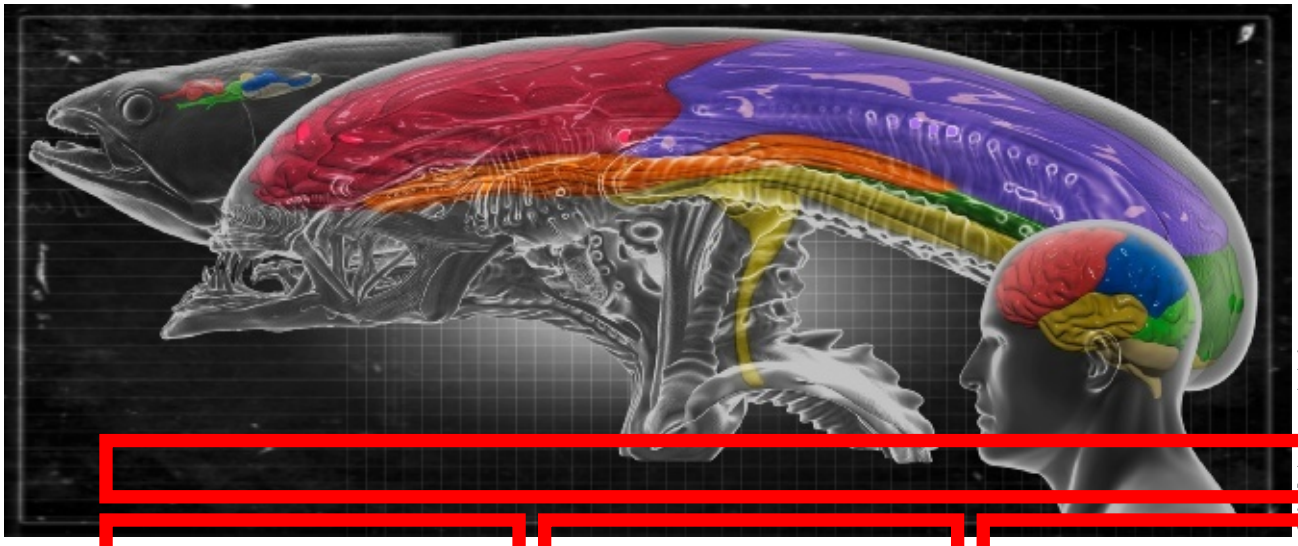
Chez les extraterrestres *craniates*, le développement du cerveau semble s'être opéré aux dépens de la face : celle-ci devient souvent plate et réduite. Ainsi, le crâne de *E.T.*, volumineux et triangulaire quand il est vu de dessus, suggère un cerveau de belle taille. Moins sympathique, *Alien* du plasticien Hans Ruedi Giger présente une face très réduite et un crâne tubulaire, allongé vers l'arrière, ce qui suggère également un cerveau développé *(voir la figure 2)*. Du point de vue biomécanique, une grosse tête nécessite, au niveau du cou, des muscles et des vertèbres suffisamment robustes pour le port de tête, notamment chez les « créatures » qui marchent debout. Si le crâne superallongé d'*Alien* se situe bien dans le prolongement du dos lorsqu'il se déplace à quatre pattes, il doit être gênant quand le monstre devient bipède. Au cours de l'évolution des hominidés, la forme et la taille du crâne ont aussi



Warner Bros

1. LES EXTRATERRESTRES DE *MARS ATTACKS !* (Tim Burton, 1996) présentent tous un cerveau démesuré. Cette hypertrophie du crâne (nommée *macrocéphalie* sur Terre) soulève diverses questions anatomiques et fonctionnelles...

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012



© Marc Boulay, www.marcboulay.fr

2. LES POISSONS OSSEUX, TEL LE CŒLACANTHE *(en haut à gauche)*, **ont un cerveau lisse. Le cerveau des humains** *(en bas à droite)* **est doté de circonvolutions. Enfin,** ***Alien****, avec son crâne démesurément long, est un représentant des extraterrestres à grosses têtes** *(au milieu)*.

évolué : notre visage est plus plat et notre crâne plus gros que ceux de nos cousins australopithèques par exemple. La station debout serait liée à la rotation vers le bas de la région du crâne où s'insère la colonne vertébrale – le basicrâne – et aurait joué un rôle dans l'augmentation du volume cérébral.

Une anomalie génétique

Les grosses têtes de l'espace présentent ce que l'on appelle cliniquement sur Terre une macrocéphalie. En biologie humaine, cette hypertrophie du crâne est un symptôme du dérèglement des gènes dits « architectes », responsables de la construction du crâne et de la face, mais aussi de celle des doigts et du système urogénital. Elle apparaît d'ailleurs souvent avec d'autres « malformations », telles qu'un écartement anormal des yeux ou la présence de doigts surnuméraires. Si les extraterrestres à grosse tête ne présentent pas les symptômes associés à la macrocéphalie humaine, c'est certainement parce que leur génome est très différent du nôtre !

Pourquoi donc de tels cerveaux ? Parce qu'en science-fiction, l'hypertrophie du crâne est souvent la marque d'un être superintelligent, disposant éventuellement de superpouvoirs mentaux, telle la télépathie. Pourtant une intelligence supérieure – nous nous garderons bien de définir la chose – n'est pas nécessairement liée à un gros cerveau. Éléphant et baleine ont un cerveau plus gros que le nôtre ; sont-ils pour autant plus intelligents ? Notons aussi que Néandertal, souvent considéré comme moins « adapté », était doté d'un cerveau 25 pour cent plus gros que le nôtre ! Quant aux grands penseurs, ils n'étaient pas forcément dotés d'un cerveau plus gros que la moyenne…

Qu'en est-il alors du rapport masse du cerveau sur masse corporelle, autre indicateur supposé de l'intelligence ? Il n'est guère plus parlant, car humains et souris seraient alors équivalents. De plus, ce rapport serait le plus important chez les petits oiseaux. Quant à l'espèce humaine, il est anormalement élevé pour les adultes. Car le crâne de la plupart des mammifères se développe plus rapidement que le reste du corps chez l'embryon. Puis le rapport diminue progressivement avec l'âge.

Ces énormes têtes relèvent-elles du fantasme du surhomme ? Sont-elles une anticipation de notre évolution ? Dans un futur plus ou moins lointain, notre cerveau se développera-t-il à l'image de ceux des aliens ? Probablement pas. D'abord, parce que la masse du cerveau et la masse corporelle évoluent simultanément. Ensuite, un trop gros cerveau pourrait devenir un inconvénient : le cerveau d'un adulte, même s'il ne représente que deux pour cent de la masse corporelle, consomme 20 pour cent de toute l'énergie métabolique. Au stade prénatal et durant la première année de vie, c'est près de 60 pour cent de l'énergie de l'enfant qui est consommée par son cerveau.

Un cerveau massif imposerait donc de fortes contraintes énergétiques. Enfin, la taille du cerveau est aussi une contrainte lors de l'accouchement, parce que le bébé doit passer dans le bassin de sa mère. Si le volume du crâne augmente au cours de l'évolution, il faut que le diamètre du bassin de la femme suive, avec les conséquences que cela peut avoir sur la locomotion, le taux de mortalité lors d'accouchements par voie naturelle, etc. Étant donné la morphologie filiforme des Martiens et l'étroitesse de leurs hanches, on imagine difficilement que l'évolution de leur bassin soit corrélée à celle de leur crâne : si les Martiennes accouchent, c'est forcément par césarienne ! Ou comment le cerveau des Martiens nous renseigne sur les difficultés que rencontrent les Martiennes pour perpétuer l'espèce… ■

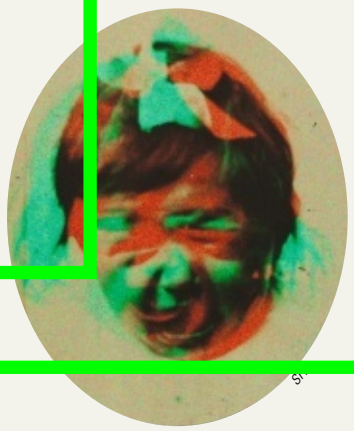
J.-S. STEYER est paléontologue au MNHN à Paris.
R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

C. Hilgetag et H. Barbas, **Plis et replis du cerveau**, *Pour la Science* n° 378, pp. 42-47, 2009.
G. Roth et U. Dicke, **Evolution of the brain and intelligence**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9(5), pp. 250-257, 2005.

ART & SCIENCE

Les objets impalpables dans l'espace

À la fin du XIXe siècle, Louis Ducos du Hauron a inventé la photographie en couleurs et les anaglyphes, c'est-à-dire les images en relief. Les principes qu'il exploite sont toujours d'actualité : ils sont mis en œuvre dans nos écrans d'ordinateur et par les missions de la NASA sur Mars !



Loïc MANGIN

Le 15 novembre 1854, la Société française de photographie est créée avec, comme modèle, l'Académie des sciences. L'objectif fixé de la nouvelle institution est de « Concourir aux progrès scientifiques et artistiques de la photographie et de ses applications ». De fait, lors de réunions publiques, photographes et scientifiques venaient présenter leurs expériences et prototypes. En outre, la Société française de photographie était la dépositaire de plis cachetés qui faisaient office de dépôt légal en vue d'éventuelles contestations de paternité. Enfin, les inventeurs lui confiaient souvent des épreuves illustrant leurs découvertes.

Ainsi, les fonds de la Société française de photographie recèlent de nombreux incunables de l'histoire de la photographie. Ils correspondent à autant d'actes de naissance de techniques toujours en cours aujourd'hui, à quelques différences près, surtout depuis l'arrivée du numérique. Lors des rencontres d'Arles 2012, une exposition organisée par Luce Lebart, directrice des collections de la Société, a mis en lumière plusieurs de ces *« premières fois »*, pour la plupart inédites. Décrivons-en certaines qui révèlent le fourmillement des inventions au tournant du XIXe siècle et du XXe.

Le 7 mai 1869, le chimiste et physicien Louis Ducos du Hauron présente à la Société les premières photographies en couleurs réalisées selon un procédé qu'il a breveté l'année précédente. Ce dernier est fondé sur le principe de la trichromie : de la même façon que nos yeux perçoivent les couleurs à partir de trois types de cellules (les cônes) photosensibles, on peut reconstituer la plupart des teintes avec seulement trois couleurs primaires, le bleu, le vert et le rouge. C'est la synthèse additive des couleurs. Le principe de ce procédé sera ensuite décliné de façon industrielle par les frères Lumière qui commercialisent à partir de 1907 leurs premiers autochromes. Ces diapositives en couleurs sur plaque de verre fonctionnent grâce à de la fécule de pomme de terre teintée dont les grains correspondent, dans le principe... aux pixels des images numériques d'aujourd'hui.

La NASA utilise une méthode mise au point à la fin du XIXe siècle pour obtenir des images en relief de Mars.

En 1891, Ducos de Hauron présente une nouvelle innovation, l'anaglyphe, ou « objet impalpable dans l'espace ». Un anaglyphe est constitué de deux images superposées de couleurs complémentaires (cyan et magenta le plus souvent) représentant la même scène vue de points décalés *(la figure b est un des premiers anaglyphes de Ducos de Hauron)*. Les images ne sont pas identiques, car le décalage, ou parallaxe, d'un même élément dans les deux couleurs est d'autant plus grand qu'il est situé près du premier plan. Le relief est restitué grâce à des lunettes bicolores qui cachent à chacun des yeux une des deux couleurs. On retrouve alors le fonctionnement stéréoscopique de la vision humaine en relief.

Le succès des anaglyphes viendra avec les images de Léon Gimpel, dont la *Jeanne qui rit, Jeanne qui pleure*, en 1920 *(voir ci-dessus)*, illustre le mécanisme de l'absorption d'une couleur par sa complémentaire : chaussez les lunettes bicolores et fermez alternativement un œil, puis un autre : la fillette est gaie ou triste.

Gimpel, photoreporter, adapte la méthode de Ducos de Hauron aux autochromes des frères Lumière et produit de nombreuses images, par exemple l'*Intérieur d'un char d'assaut type Saint Chamond*, en 1916 *(voir la figure d)*. On lui doit aussi des images de reconnaissance en avion ou en ballon d'observation. Les anaglyphes sont toujours d'actualité, le robot *Curiosity* de la NASA créant des images numériques de ce type depuis la surface de Mars !

Autre invention de cette époque, un « radar automobile. Peu après les premiers décrets limitant la vitesse, Léon Gaumont propose un appareil qui prend deux clichés à un intervalle de temps connu sur une même plaque photographique. Le décalage des images d'un véhicule *(voir la figure c)* permet de calculer sa vitesse. Citons aussi les premières photographies au microscope, la transmission d'images par téléphone... La façon d'envisager les images aujourd'hui découle de ces inventions. ■

Un laboratoire des « premières fois » : les collections de la Société française de photographie, Rencontres d'Arles 2012, du 2 juillet au 23 septembre 2012. www.sfp.asso.fr/blog/collection

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

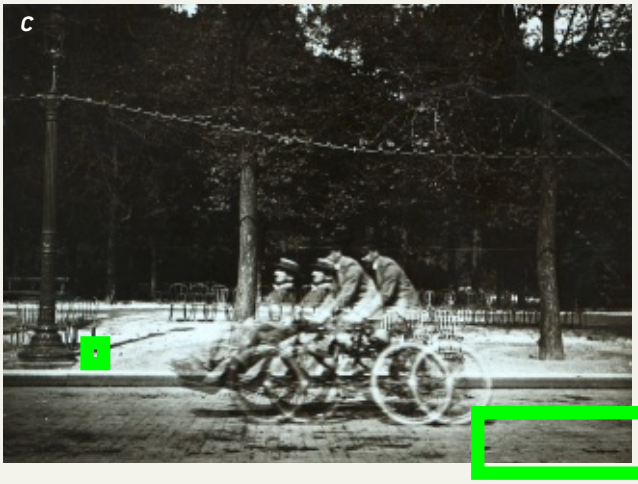
a

SFP

b

SFP

c



SFP

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

IDÉES DE PHYSIQUE

Les torches à plasma

De l'air soufflé à travers un arc électrique intense produit un gaz ionisé à haute température… et à usages multiples.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

En créant sur Terre des conditions de températures similaires à celles régnant à la surface du Soleil, ne pourrait-on pas neutraliser les déchets les plus toxiques ? Avec des températures de l'ordre de 10 000 °C dans leur cœur, les torches à plasma ont une voie prometteuse. Initialement dédiées à tester la résistance des matériaux aux températures élevées, elles consistent à ioniser partiellement un gaz en l'insufflant à travers un arc électrique très dense en énergie. Le jet de plasma (gaz ionisé) ainsi créé, très chaud, fait déjà l'objet d'applications industrielles dans la soudure ou la découpe de métaux ; mais il pourrait aussi révolutionner le traitement des déchets.

Comment obtenir un jet de plasma utilisable ? La première étape consiste à ioniser un gaz, de l'air par exemple, en établissant un arc électrique entre deux conducteurs distants l'un de l'autre. En appliquant une tension suffisamment élevée à leurs bornes, on crée un courant électrique. Après un amorçage réalisé par exemple en rapprochant les deux électrodes, le phénomène s'entretient de lui-même.

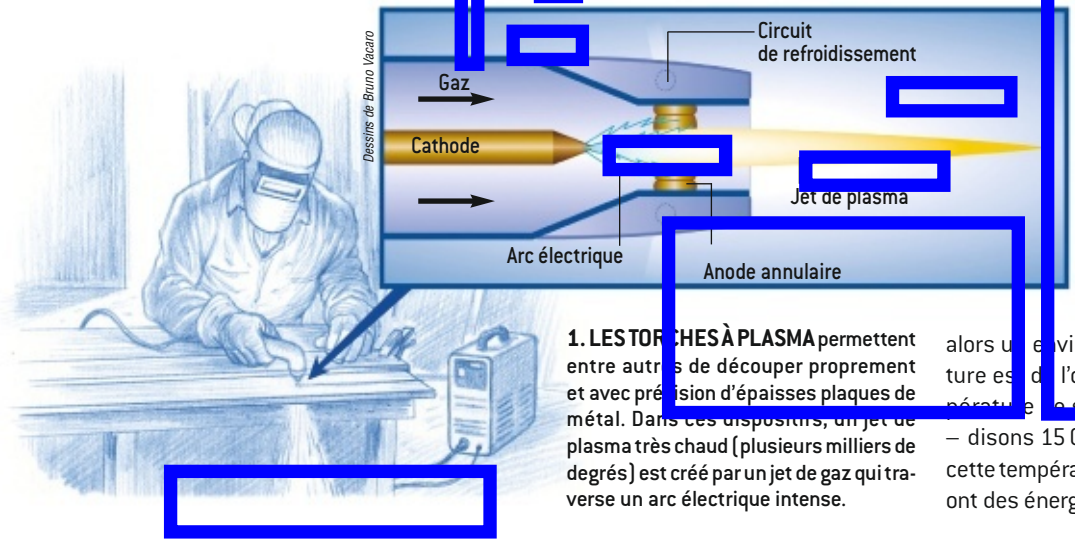
Un jet de gaz ionisé à plus de 10 000 °C

Les électrons présents, accélérés par le champ électrique régnant dans l'espace entre les conducteurs, ont assez d'énergie cinétique pour ioniser les molécules neutres qu'ils heurtent. Une telle collision produit un ion et un électron supplémentaire, lequel est accéléré, et ainsi de suite.

Cette cascade transforme le milieu isolant et neutre en un plasma (état de la matière partiellement ou totalement ionisée) conducteur. Les molécules du gaz peuvent aussi être simplement excitées, c'est-à-dire portées à un niveau d'énergie supérieur, auquel cas elles émettent un photon au moment de la désexcitation. L'arc électrique, comme la foudre, est donc lumineux.

Le courant électrique dans un arc est beaucoup plus intense que dans les lampes à décharge, car les électrons sont émis en grand nombre par la cathode, par effet thermoïonique : cette électrode est si chaude (environ 2 000 °C ou plus (d'où la nécessité d'utiliser des métaux à haut point de fusion, tels que le tungstène), que les électrons du métal acquièrent suffisamment d'énergie pour s'échapper spontanément de sa surface. On obtient ainsi des courants qui peuvent atteindre des centaines d'ampères sous des tensions de quelques dizaines de volts seulement.

Pour créer un jet de plasma, la deuxième étape consiste à souffler un gaz initialement neutre à travers l'arc. Il faut être astucieux et limiter l'espace occupé par l'arc grâce à la géométrie des électrodes, afin que la puissance électrique fournie se retrouve concentrée dans un tout petit volume. Les molécules du gaz rencontrent alors un environnement dont la température est de l'ordre de grandeur de la température de surface du Soleil, voire plus – disons 15 000 °C pour fixer les idées. À cette température, les constituants de l'arc ont des énergies cinétiques moyennes de



1. LES TORCHES À PLASMA permettent entre autres de découper proprement et avec précision d'épaisses plaques de métal. Dans ces dispositifs, un jet de plasma très chaud (plusieurs milliers de degrés) est créé par un jet de gaz qui traverse un arc électrique intense.

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

l'ordre de deux électronvolts, une valeur assez élevée pour ioniser ou dissocier les molécules du jet (il faut cinq électronvolts pour rompre la liaison entre les deux atomes de la molécule de dioxygène, O_2). Il en résulte à la sortie un nouveau plasma partiellement ionisé, sans doute un peu moins chaud, mais qui occupe un espace plus important, que l'on peut diriger et contrôler en jouant sur les propriétés de l'écoulement gazeux (débit, forme de la buse, etc.).

Dans la torche à plasma dite à arc soufflé *(voir la figure 1)*, l'arc s'établit entre une cathode en forme de pointe et une anode cylindrique évidée qui sert de tuyère d'éjection à la colonne de plasma. Le plasma jaillit de la buse sous la forme d'un « dard », un pinceau cylindrique très lumineux qui s'estompe rapidement dans l'air.

En pratique, les températures obtenues dépendent de nombreux paramètres (nature du gaz choisi, géométrie de l'anode, etc.). De plus, comme dans une flamme, elles varient fortement au sein même du plasma. Le point crucial est que les températures dépassent celles obtenues par d'autres procédés. Alors que la flamme d'un chalumeau à acétylène, particulièrement chaude, atteint 3 000 °C, le cœur d'une torche à plasma peut dépasser 10 000 °C.

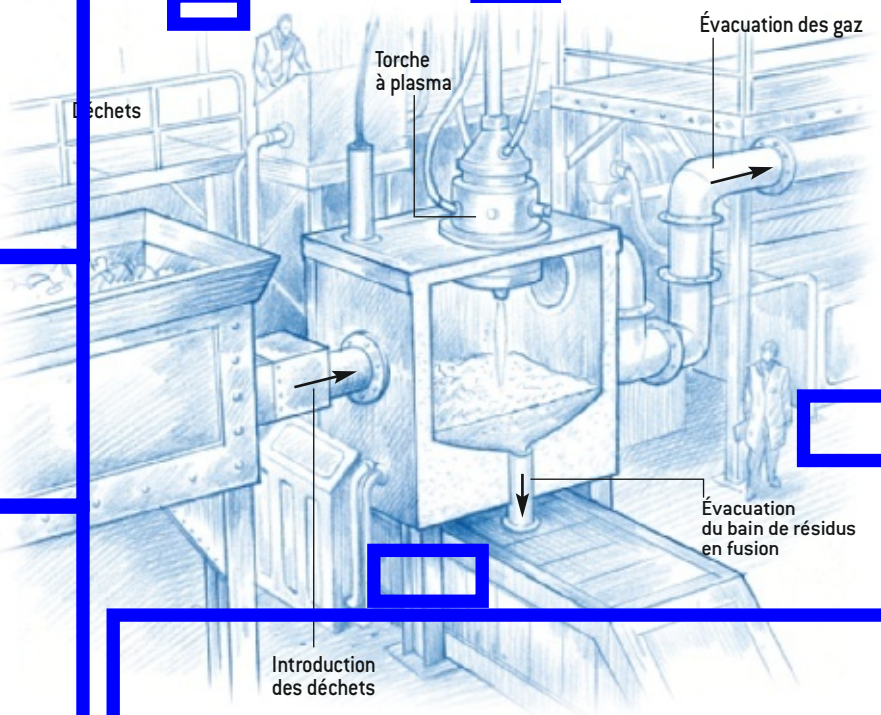
Découper du métal, traiter des déchets

La palette d'applications est très vaste, notamment en métallurgie. La température du dard de plasma est en effet si élevée qu'il fait fondre presque instantanément le métal, ce qui permet de souder, de découper, de percer... Bien souvent, le métal traité sert lui-même d'anode, le jet de plasma étant confiné spatialement grâce à un jet de gaz secondaire, qui sert aussi à refroidir la buse ou à isoler de l'atmosphère la pièce usinée. Par ailleurs, le débit gazeux du dard est suffisamment localisé pour que la découpe soit précise, et assez important pour chasser les gouttelettes de métal en fusion, ce qui rend la découpe propre.

Au moyen d'une torche à plasma de 100 ampères et 15 kilowatts, on atteint ainsi des vitesses de découpe de l'ordre de 50 centimètres par minute pour des plaques de 30 millimètres d'épaisseur, avec une précision de l'ordre de 0,2 millimètre.

Depuis quelques années, la torche à plasma s'utilise aussi dans des unités de traitement de déchets *(voir la figure 2)*. Les cendres d'incinération d'ordures ménagères, les matériaux amiantés ou radioactifs sont trop dangereux pour être remises tels quels dans une décharge. Au moyen de torches à plasma, on vitrifie ces déchets, c'est-à-dire qu'on les transforme en un solide amorphe, autrement dit en solide dépourvu de structure cristalline (comme le verre). Les avantages sont multiples : l'amiante n'est plus sous forme de fibres, les métaux lourds des cendres ou les éléments radioactifs sont piégés dans une matrice inerte où la diffusion des atomes est extrêmement lente.

Ainsi, à Morcenx, dans le département des Landes, la Société *Inertam* gère une usine entièrement consacrée au traitement des déchets amiantés. Inauguré



2. DEPUIS QUELQUES ANNÉES, des fours industriels fonctionnant sur le principe des torches à plasma permettent d'incinérer des déchets contenant de l'amiante ou des matières radioactives et de vitrifier les résidus de l'incinération. Leur utilisation est envisagée pour traiter aussi des déchets plus ordinaires.

■ LES AUTEURS

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

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur www.pourlascience.fr

en 2005, son four de vitrification est chauffé par trois torches à plasma, deux d'une puissance de deux mégawatts qui maintiennent le bain de déchets en fusion, une de plus faible puissance (500 kilowatts) afin de maintenir le verre suffisamment fluide et homogène avant son évacuation du four. Avec son prototype SHIVA, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) développe aussi, sur le principe des torches à plasma, un nouveau procédé d'incinération et vitrification pour les déchets radioactifs.

Si l'avenir des techniques de traitement par torches à plasma semble assuré pour les déchets amiantés et radioactifs, pour lesquels il n'y a guère d'alternatives, la question se pose pour des déchets plus ordinaires. Soumis aux hautes températures des torches à plasma, les déchets libèrent (outre les résidus en fusion) des gaz qui, une fois filtrés, peuvent servir de combustibles dans une turbine à gaz et fournir de l'énergie avec un très bon rendement. Ces gaz doivent être filtrés en raison des composés dangereux qu'ils renferment, tel le chlore, mais ils ne contiennent plus les molécules organiques telles que les très toxiques dioxines engendrées par les incinérateurs usuels, car elles sont décomposées par la chaleur extrême du plasma.

Cependant, selon l'ADEME (Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie), ces promesses d'avantages environnementaux et énergétiques méritent de plus amples confirmations, malgré le développement de plusieurs prototypes dans divers pays. La prudence est donc de rigueur et le problème de la gestion des déchets produits par l'humanité reste entier. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

E. Gomez *et al.*, **Thermal plasma technology for the treatment of wastes : a critical review**, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161 (2-3), pp. 614-626, 2009.

Avis de l'ADEME sur le traitement des déchets par torche à plasma (2012) : http://www2.ademe.fr/, rubrique *Déchets*, puis *Avis et fiches techniques*

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

TV MAGAZINE

DOC

OKAPI

bayard

POUR LA SCIENCE

familiscope.fr

FÊTE DE LA SCIENCE

du **10** au **14** octobre 2012
plus de **3000** animations scientifiques
dans toute la **France**

Accès site mobile

www.fetedelascience.fr
www.facebook.com/fetedelascience

CARRÉment instructif

CARRÉment mystérieux

CARRÉment intéractif

CARRÉment curieux

Sciences au CARRÉE

PLACE CARRÉE
DU FORUM
DES HALLES
PARIS 1ER

du 10 au 13 octobre 2012

FÊTE DE LA SCIENCE
du 10 au 14 octobre 2012
www.fetedelascience.fr

cea · cnes · cnrs · Ifremer · IFP Energies nouvelles · Inserm · IRD · irstea · METEO FRANCE Toujours un temps d'avance

AVEC LE SOUTIEN DE : casden · forum des Halles · MAIRIE DE PARIS · SCIENCE · SCIENCES SUR SEINE · SemParisSeine

SCIENCE & GASTRONOMIE

Conserver les vins au frais

Des chauffages même brefs provoquent des modifications irréversibles.

Hervé THIS

La couleur du vin rouge change au cours de son vieillissement, mais aussi selon la température de stockage. On dit que des températures de cave comprises entre 10 et 16 °C sont préférables, et l'on ajoute même que l'essentiel est la constance de la température, au cours de l'année. Qu'en penser ?

Rien ne vaut l'expérience. Partons d'une rose un peu pâle, dont nous broyons les pétales avec de l'eau, au mépris de tout romantisme. Puis filtrons le broyat dans un simple filtre à café : la solution recueillie est rose pâle. Acidifions à l'aide d'une goutte de vinaigre cristal, incolore : la couleur change vers le rouge. Ajoutons un peu de ce bicarbonate de sodium que nous ne manquons pas de trouver sur nos étagères de cuisine, et c'est une autre teinte qui apparaît, plus bleutée. Ajouterions-nous des ions métalliques que, à nouveau, de nouvelles couleurs apparaîtraient.

Pourquoi ces changements ? Parce que les pétales de rose, comme les baies de raisin, doivent leur couleur à des composés phénoliques, les anthocyanines, et que ces composés peuvent soit former des ions en milieu acide, soit former des complexes en présence d'ions métalliques. La propriété a été utilisée par les premiers chimistes modernes pour explorer le monde des acides et des bases : on s'intéressait alors au changement de couleur du « syrop de violette ».

Ces changements « classiques » ne sont toutefois pas le fin mot de l'affaire. Tout d'abord, les pigments phénoliques peuvent « polymériser », formant des molécules de plus en plus grosses. En outre, dans les années 1990, Raymond Brouillard et ses collègues de l'Université de Strasbourg ont montré l'importance du phénomène de copigmentation des molécules des composés phénoliques s'empilant (copigmentation intermoléculaire) ou se repliant sur elles-mêmes (copigmentation intramoléculaire), ce qui change la couleur des molécules.

Cela étant, à quelle température faut-il conserver les vins pour garder leur robe ? Parmi les chimistes intéressés par la stabilité des anthocyanines, peu avaient pris en compte la dissociation des associations supramoléculaires responsables de la copigmentation. Pourtant, de telles associations, de faible énergie, sont dissociables par une élévation de température. Laquelle ?

La question est théoriquement complexe : non seulement les composés phénoliques sont variés, mais, de surcroît, nombre de phénomènes s'ajoutent. On sait notamment que des composés phénoliques incolores protègent les anthocyanines contre les hydrolyses, renforçant les empilements et la couleur.

À l'Université de Pecs (Hongrie), Sandor Kunsagi-Maté et ses collègues ont étudié deux vins rouges, le Teleki Villanyi Portugieser et le Bikatory, dont la composition a été caractérisée, tandis que la couleur, principalement due au 3-glucoside de malvidine, était exprimée par spectroscopie dans le visible et l'ultraviolet. Les vins, initialement stockés à 10 °C, ont été chauffés pendant des durées variant entre cinq minutes et une heure, à des températures comprises entre 20 et 40 °C, leur couleur étant enregistrée toutes les cinq minutes.

Quarante degrés ? Cela peut sembler peu : environ la température ambiante dans certaines villes, au cours de l'été. Pourtant, pour l'un des deux vins, un chauffage de seulement cinq minutes à 30 °C suffit à modifier la couleur, sans doute parce que ce vin, moins oxydé, contenait plus de molécules phénoliques ne s'étant pas associées en oligomères. La détermination des énergies des diverses réactions mises en jeu montre la présence de réactions très lentes à température ambiante, mais qui sont activées par le chauffage. L'oxydation du 3-glucoside de malvidine semble essentielle et la présence de composés phénoliques incolores protecteurs apparaît déterminante. Les empilements de composés phénoliques sont lentement remplacés par des polymères. En tout cas, les variations de couleur dues aux changements d'acidité semblent à exclure, alors que le degré d'alcool et le contenu en sels minéraux déterminent la stabilisation des complexes copigmentaires.

Quelle que soit l'interprétation moléculaire (difficile et discutée) des changements, les amateurs trouvent avec ces études des recommandations essentielles : ne sortons pas trop tôt nos bouteilles de la cave avant de les boire, sous peine de les transformer irréversiblement ; stockons à des températures aussi basses que possible, afin de conserver durablement la couleur... et le goût des composés phénoliques auquel nous, heureux mortels, sommes sensibles. ■

Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

.fr Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

➜ MATHÉMATIQUES

Théorème vivant

Cédric Villani

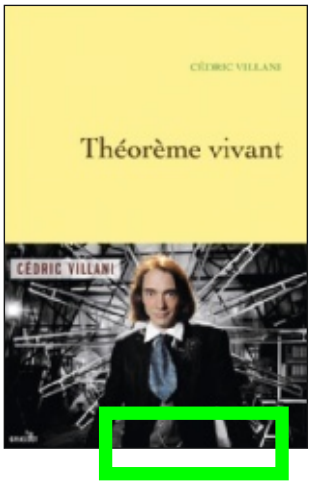
Grasset, 2012
(288 pages, 19 euros).

Vous souvenez-vous du jeu des perles de verre, le livre de Hermann Hesse qui lui valut, dit-on, le prix Nobel ? Les règles de ce jeu mathématique et musical ne sont pas connues, mais Hesse raconte comment la connaissance du jeu-règle d'apprentissage permet au héros de progresser dans la connaissance. Le livre de Cédric Villani lui ressemble en un point : s'il est encore possible de comprendre l'objet de sa quête, l'amortissement des ondes dans un plasma prévu par le physicien soviétique Lev Landau en 1946, le cheminement mathématique de C. Villani reste mystérieux aux profanes que nous sommes, amis lecteurs, à peu près tous.

Landau expliquait le phénomène « avec les mains, en physicien génial » et l'effet physique avait été confirmé expérimentalement. Cependant, la théorie mathématique, entachée de paradoxes, laissait à désirer. Associé à Clément Mouhot, C. Villani a résolu le problème qui avait nargué les mathématiciens et les physiciens pendant plus d'un demi-siècle. Il obtint pour ce fait d'armes et pour le reste de ses travaux sur les phénomènes de transport, la médaille Fields, la plus haute distinction mathématique.

Le livre est un compte-rendu émouvant de l'épopée d'une recherche, parcours jalonné de découragements, de moments d'exaltation, de faux espoirs, d'analogies fructueuses, d'impasses apparemment rédhibitoires, d'articles refusés, puis du triomphe final. Tout cela exprimé dans des courriels et des comptes-rendus de conversation avec des mathématiciens marquants contemporains dans un tourbillon de « vie pleine de joies et de peines entremêlées inextricablement ». L'ouvrage donne une parallèlement des aperçus sur la vie de grands mathématiciens et leur participation aux problèmes actuels des mathématiques.

Nul doute, C. Villani est un hédoniste des mathématiques : il se décrit sans fausse modestie et sans cacher ses espoirs pour la médaille Fields. C'est un mathématicien moderne ancré dans la vie et bien loin de l'image du savant penché sur des calculs abstraits et interminables qui ne sait goûter aux plaisirs de l'existence. L'auteur a la volonté de livrer sentiments et pensées pour montrer comment un mathématicien travaille ; certes, les mathématiciens ne portent pas tous une cravallière et un bijou araignée au revers de leur veste, mais ces petites ou grandes extravagances, qui existent chez d'autres sous des formes différentes, témoignent de la diversité actuelle des mathématiciens. Les costumes trois pièces de Dieudonné ou les toges des *Preceptor Germaniae* ne sont plus des tenues obligées.



Le livre illustre le changement d'orientation des mathématiques : Bourbaki est bien mort, car la volonté d'unification structuraliste du XXe siècle a fait place à une inspiration issue de la physique. Les mathématiques évoluent ainsi, parfois indépendamment du monde, parfois sous l'inspiration des sciences naturalistes. Pour évaluer ce changement d'esprit, comparer le témoignage de C. Villani à l'autre excellent livre, *I Want to Be a Mathematician : An Automathographer* du regretté Paul Halmos, un mathématicien de la génération précédente.

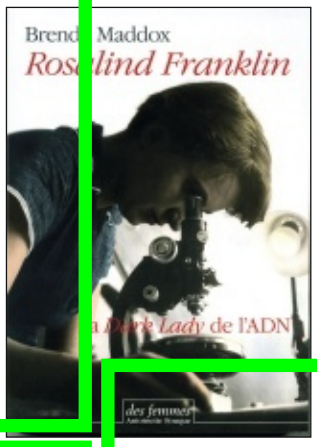
➜ HISTOIRE DE LA BIOLOGIE

Rosalind Franklin : La Dark Lady de l'ADN

Brenda Maddox

Des femmes, 2012
(281 pages, 20 euros).

Brenda Maddox nous livre une biographie documentée et agréable à lire sur la vie mouvante de Rosalind Franklin. Jeune cristallographe brillante travaillant au *King's College* à Londres au début des années 1950, Rosalind Franklin avait accumulé des données sur la structure de l'ADN, obtenues par la technique de diffraction des rayons X, et elle était probablement très proche d'élucider elle-même cette structure lorsque son travail fut utilisé à son insu, notamment *via* la complicité de son patron Maurice Wilkins, par Jim Watson et Francis Crick qui travaillaient dans le Laboratoire Cavendish, concurrent situé à l'Université de Cambridge. Ces trois comparses obtinrent le prix Nobel alors que la contribution de



Rosalind Franklin fut longtemps ignorée. Elle est morte quelques années après la découverte de la double hélice de l'ADN d'un cancer des ovaires, en 1958, à l'âge de 38 ans.

Cette biographie décrit particulièrement bien l'atmosphère régnant à cette époque dans les meilleurs laboratoires de différents pays dans lesquels elle a séjourné, notamment l'Angleterre, mais aussi la France, qu'elle appréciait pour différentes raisons, professionnelles, culturelles et sociales, où elle a travaillé de 1947 à 1950 au Laboratoire central des services chimiques de l'État. Elle y a appris les techniques de diffraction des rayons X.

Ce livre décrit aussi admirablement les relations complexes et ambiguës de chercheurs travaillant sur le même sujet, mêlant rivalité et amitié (parfois également l'amour) dans une compétition pour la reconnaissance qui dérape souvent dans des comportements peu déontologiques, dont Rosalind Franklin fut précisément la victime.

Au-delà, dans cette histoire, nous assistons à l'affrontement de deux conceptions différentes de la recherche scientifique. D'un côté, Crick et Watson prêts à faire des modèles s'appuyant sur des hypothèses intuitives et, de l'autre, Rosalind Franklin, qui se refusait

© Pour la Science - n° 420 - Octobre 2012

de la modélisation et désirait élucider la structure de l'ADN de façon déductive uniquement à partir de données qu'elle croyait irréfutables. C'est un document passionnant dont je recommande la lecture sans réserve.

→ Jean-Jacques Kupiec
Centre Cavaillès, ENS/CNRS, Paris

→ GÉOGRAPHIE

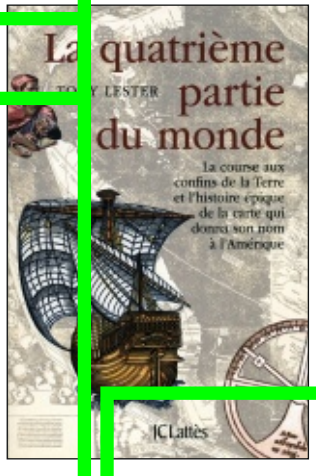
La quatrième partie du monde

Toby Lester
JC Lattès, 2012
(750 pages, 25 euros).

La présence de six continents sur le globe terrestre nous semble aujourd'hui une évidence. À la question « où sommes-nous ? », nous brandissons nos GPS et, tout naturellement, notre position apparaît sur une carte rectangulaire, où le Nord est en haut et dont les lignes nous sont familières. Pourtant, il y a quelque 550 ans, nous ignorions encore tout des régions un peu trop éloignées de l'Europe.

Au-delà de la découverte de nouveaux mondes, un tout aussi grand défi réside dans la capacité à les représenter sur une carte aux conventions géographiques partagées par tous et aux distances réalistes. Ce défi est relevé en 1507 par deux moines du monastère de Saint-Dié-des-Vosges qui, après avoir superposé aux connaissances antiques les récents récits de voyage, font apparaître pour la première fois le toponyme « America » sur un planisphère géant et signent ainsi « l'acte de naissance de l'Amérique ».

Ce planisphère est d'autant plus exceptionnel que, pour la première fois, ce Nouveau Monde est présenté comme un continent entouré d'eau – rompant ainsi avec les idées de Christophe Colomb, du marchand et navigateur italien Amerigo Vespucci qui pensaient avoir découvert une nouvelle partie de l'Asie. Il n'en reste aujourd'hui qu'un exemplaire acheté par la Bibliothèque du Congrès à Washington pour la somme inestimable de dix millions de dollars. Intrigué par un tel document historique, Toby Lester, journaliste, décida d'enquêter sur ses origines et tout le contexte qui permit son émergence.



Bien au-delà de l'histoire de cette carte, c'est l'histoire de la cartographie mondiale et des bouleversements culturels, politiques et économiques qu'elle apporta que nous livre T. Lester dans cet ouvrage richement illustré. Avec une rigueur scientifique et l'appui d'un grand nombre de références pour démêler légendes et vérités, il nous entraîne dans un voyage palpitant. On découvre notamment des désirs collectifs autant que des intérêts personnels ont fait progresser la connaissance. Dans cette histoire complexe, il n'est pas nécessaire de prendre la mer pour participer aux avancées scientifiques. T. Lester nous apprend à lire entre les lignes des planisphères pour en comprendre toutes les significations. On referme ce livre avec un œil neuf sur les cartes qui nous entourent, et peut-être plus indulgent sur les erreurs du passé.

→ Daphné Lercier
LAREG/CNRS, Paris

→ ANTHROPOLOGIE

Le proche et le lointain

Hassan Rachik
Parenthèses éditions, collection méditerranéenne des sciences de l'homme, 2012
(272 pages, 22 euros).

Les travaux d'anthropologie ont longtemps été produits par des Occidentaux. Mais aujourd'hui, à l'heure de la critique postcoloniale, des chercheurs issus des anciens pays colonisés relisent de manière critique l'histoire de l'anthropologie. C'est le cas avec cet ouvrage qui met au jour les présupposés à l'œuvre depuis un siècle dans les études sur le Maroc.

À la fin du XIXe siècle, le Maroc, sultanat interdit aux chrétiens, était vu comme un pays mystérieux et dangereux par les rares explorateurs européens, en même temps qu'intéressant à coloniser. L'ancien officier de l'armée française Charles de Foucauld en est un des premiers chroniqueurs, déguisé en juif marocain. Il produit un certain nombre de stéréotypes concernant le « caractère » marocain : tendance au vol et au mensonge, mœurs dissolues. À la même époque, Auguste Moulié, professeur d'arabe à Oran, pense que l'islam est le « mal » qui pervertit les Marocains, persuadé que la religion règle tous les aspects de leur vie, un autre préjugé qui aura la vie longue.

Brèves

ENSEIGNER, C'EST ESPÉRER

Pierre Léna
Le Pommier, 2012
(216 pages, 19 euros).

Quelle école pour demain ? Cofondateur de *La main à la pâte*, projet qui, depuis 1996, propose aux classes de faire de la science, l'auteur s'inspire de cette expérience pour proposer une école en phase avec son temps. À l'heure où l'information est omniprésente, l'école doit plus que jamais, outre transmettre des savoirs, structurer les esprits face au flux de données. Pour cela, inutile de changer les programmes. En revanche, l'invention du métier et de la formation du professeur s'impose…

SCIENCE ET MAGIE

(textes recueillis par)
Chêne, 2012
(240 pages, 15,50 euros).

Un instantané de la science du siècle des Lumières : c'est ce que propose ce petit recueil de morceaux choisis. Des extraits de Buffon et de Fontenelle y côtoient des passages de l'*Encyclopédie* de Diderot, du Traité des sensations de Condillac, mémoires de l'Académie des sciences, mais aussi des lettres, réflexions et maximes de l'époque sur les sciences. À butiner…

ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

Chantal Aspe et Marie Jacqué
MSH/Quæ, 2012
(280 pages, 30 euros).

Comment s'est construit notre rapport à l'environnement depuis 1970 ? En déclinant cette question sous les angles social, politique, économique et scientifique, les auteurs dressent une histoire passionnante où s'imbriquent enjeux sociétaux, conflits d'intérêt et expertise.

Brèves

À L'AUBE [S]PIRITUELLE DE [L']HUM[AIN]

Mar[c]el Otte
Odile Jacob, 2012
(185 pages, 22,90 euros).

Le spirituel, pour l'auteur, c'est tout ce qui a trait à la pensée. Il tente ici une histoire évolutive de l'élaboration du spirituel par notre espèce, qui lui permet d'en ordonner les grandes inventions successives. Ainsi cette frappante formule introduisant une de ces grandes étapes : « Partout, dans les [...] spirituelles, arrive un certain moment où l'homme donne sa propre image aux forces de la nature. Les dieux sont nés. »

CAFÉ, CRIME, SAVON ET C[IE]

Muriel Chi[...]n-Charrier
EDP Science[s], 2012
(176 pages, [...] euros).

Si vous êtes curieux des raisons de toutes ces petites anecdotes du matin, ce livre est pour vous. De la chimie du café et du chocolat à celle du savon et des cosmétiques familiers, vous apprendrez beaucoup et facilement en suivant les pensées d'un personnage prétexte. À lire un peu tous les matins…

L'IM[PR]ENSABLE HASARD

Nicol[as] Gisin
Odile Jacob, 2012
(150 pages, 21 euros).

Les deux grands pans de la physique que sont la relativité et la théorie quantique semblent contradictoires : la première est locale et la seconde non locale. L'auteur de l'expérience de Bernex-Bellevue, où ce conflit est illustré dans des conditions spectaculaires, explicite ici le « jeu de Bell », c'est-à-dire les raisonnements mettant en évidence la non-localité de la nature. Préfacé par Alain Aspect, ce petit livre traite d'un sujet ardu, mais est [...] ses lecteurs au point de les prévenir d'emblée qu'à la fin, ils n'auront « pas tout compris ».

Après l'avènement du protectorat français (1912), les ethnologues sont majoritairement des fonctionnaires coloniaux et se méfient, tel Edmond Doutté, des nomades, dont le fanatisme religieux trahit leur peur primitive de l'étranger et de l'innovation. Dans les années 1930, alors que le pouvoir colonial cherche à pacifier les dernières tribus berbères rebelles, Émile Laoust invente la distinction entre Berbères (supposés purs, non influencés par les Romains ni par l'islam) et Arabes.

Après guerre, les connaissances ethnologiques sur le Maroc progressent vers plus d'objectivité : avec Jacques Berque, qui réalisait ses enquêtes sans interprète puisque maîtrisant l'arabe classique, le dialecte marocain et, dans une moindre mesure, le berbère. Puis Ernest Gellner, qui montre que la religion tribale, faite de rituels locaux (soufisme maraboutique), a été progressivement réformée pour ressembler à celle des villes, alors que l'homogénéisation culturelle est imposée par la Révolution industrielle. Pourtant, même chez les auteurs plus récents, comme Clifford Geertz, se perpétue la vision d'un islam national puritain et fondamentaliste. Par cette patiente enquête, Hassan Rachik, chercheur marocain, montre les limites des travaux ethnographiques sur le Maroc, les chercheurs occidentaux étant la plupart du temps, et en dépit de travaux souvent novateurs, empêtrés dans les clichés de leur époque.

➜ Régis Meyran
École des hautes études [...]

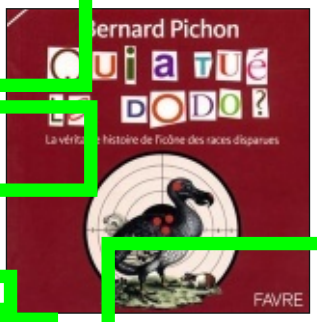
HISTOIRE NATURELLE

Qui a tué le dodo ?

Bern[ard] Pichon
Favre, 2012
(108 pages, 14,80 euros).

Le dodo jouit d'une célébrité posthume indiscutable. Son aspect rondouillard et débonnaire qu'on lui prête suscite la sympathie – du moins de nos jours (les naturalistes d'antan ne voyaient pas forcément les choses ainsi. Bernard Pichon nous rappelle que Buffon fit du dronte, comme on l'appelait alors, un portrait extrêmement peu flatteur). Du fait de son actuelle popularité, il peut à la fois tenir la vedette dans des livres pour enfants et des films d'animation, figurer sur des canettes de bière et des timbres-poste, et jouer le rôle de symbole des espèces animales exterminées par l'homme. Mais si l'on se penche de plus près sur ce pigeon géant et incapable de voler propre à l'île Maurice (pour résumer ce qu'était *Raphus cucullatus*, puisque tel est son nom scientifique), les choses se compliquent.

Comme l'écrit très justement l'auteur, « l'image du dodo est un puzzle élaboré sur trois cents ans. Si les pièces qui le composent



s'ajustent si mal, c'est qu'elles se réfèrent à des fantasmes et à des théories contradictoires ». En effet, aucun naturaliste digne de ce nom ne put étudier le dodo avant qu'il ne disparaisse, vers la fin du XVII[e] siècle, et les données aujourd'hui disponibles (ossements, récits de navigateurs, dessins et peintures nombreux, mais de fiabilité très variable) laissent subsister de nombreuses zones d'ombre. Même une caractéristique *a priori* aussi banale que le poids de cet oiseau demeure l'objet de controverses.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, il reste donc beaucoup à découvrir au sujet du dodo, de sa biologie et des circonstances de sa disparition – et les recherches, d'ailleurs, se poursuivent, allant à l'île Maurice que dans les divers musées du monde qui conservent des ossements de *Raphus cucullatus*. Dans ce petit livre remarquablement bien illustré et agréable à lire, B. Pichon présente clairement l'essentiel de ce que nous savons, et nous rappelle ce que nous ne savons pas encore sur cet oiseau à la fois célèbre et méconnu.

➜ Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris

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

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – OCTOBRE 2012 – N° d'édition 077420-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/175 888 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.