

■ POUR LA SCIENCE

Mars 2012 - n° 413

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les dynasties des pharaons

3 000 ans redatés
par le carbone 14

**La physique
des gloires**

Des arcs-en-ciel
du troisième type

L'aléatoire vrai

Peut-on le fabriquer ?

Les toxines botuliques

Du poison au médicament

M 02687 - 413 - F: 6,20 €



Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 EUR - 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.

OFFREZ LES CLÉS DE LA SCIENCE !

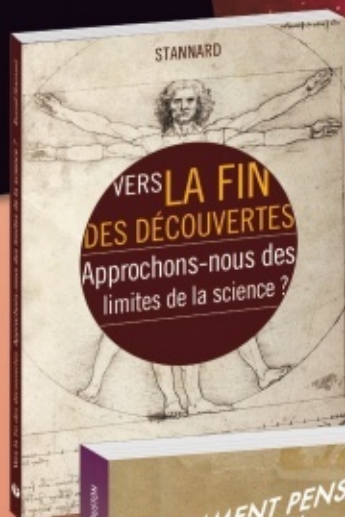


À LA DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique
Neil COMINS

« À la découverte de l'univers » propose une visite guidée, simple mais superbement illustrée, et très complète de l'univers depuis les recoins du système solaire jusqu'aux galaxies les plus lointaines.

568 pages - 49 € - Novembre 2011

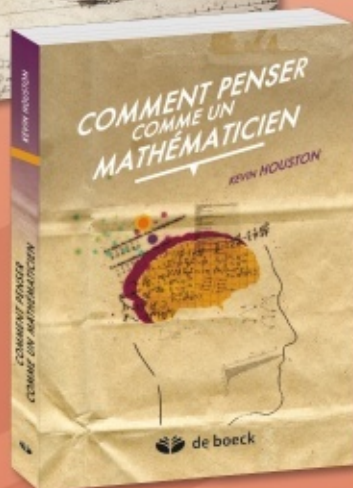


VERS LA FIN DES DÉCOUVERTES

Approchons-nous des limites de la science ?
Russell STANNARD

Une réflexion sur les progrès apportés par la science, avec ses limites, qui est censée éveiller un sens de profond respect face aux mystères de l'existence.

168 pages - 19 € - Août 2011



COMMENT PENSER COMME UN MATHÉMATICIEN

Comprendre, expliquer et étudier
Kevin HOUSTON

En chacun, il y a un mathématicien qui s'ignore. Ce livre vous aidera à révéler celui qui est en vous !

306 pages - 22 € - Juin 2011

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 Tacquenot,

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 :

Sophie Gallé-Soas, Olivier Goureau, Nadine Guilhou,

Daiki Horikawa, Évelyne Host-Platret, Julien Laval,

Xavier Manière, Christophe Pichon, Anita Quilès.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

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

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

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

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

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

SCIENTIFICAMERICAN 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 : Steven 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. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

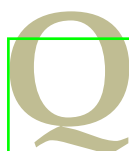
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Vie active... ou inactive



Qu'est-ce que la vie ? Le mot est banal, ce qu'il recouvre

ne l'est pas. Comme d'autres notions, telles que le

temps ou l'intelligence, la vie est difficile à définir. Les

réponses apportées à la question ont varié au fil des

siècles. Un organisme vivant se caractérise par quelques

propriétés : il assimile des nutriments, se développe et se reproduit. Et

il meurt. Aussi pourrait-on définir la vie comme le fit le médecin Fran-

çois Xavier Bichat (1771-1802) : « La vie est l'ensemble des fonctions

qui résistent à la mort. »

Cette définition s'applique parfaitement aux tardigrades. Ces petits

organismes (ils mesurent moins de un millimètre) résistent au manque

d'oxygène, à la déshydratation, à des températures proches du zéro

absolu ou atteignant 150 °C, à d'intenses rayonnements, à de multiples

conditions extrêmes... Qui plus est, les tardigrades représentent un cer-

tain succès évolutif : il en existerait un millier d'espèces, vivant dans l'eau

ou les milieux humides. Un de leurs secrets est leur capacité à adopter

une forme de vie inactive, à la limite de la vie, et dont ils ne sortent qu'au

moment où les conditions sont redevenues favorables (voir *Les tardi-*

grades, survivants de l'extrême, page 70).

Une forme de vie à la limite de la vie.

La vie et la mort tissent d'autres liens, comme l'illustrent les toxines

botuliques. Ces substances sont des poisons pouvant entraîner la mort

par paralysie des muscles respiratoires. Toutefois, elles soignent les

personnes atteintes de contractions musculaires excessives. Les toxines

botuliques, qui relâchent les muscles, font disparaître ces contractions

handicapantes (voir *Toxines botuliques : poison et médicament, page 42*).

Elles améliorent la qualité de vie de ces personnes.

Si l'on ne définit pas facilement la vie, on ne sait pas mieux répondre

à la question : de quand datent les premières formes de vie complexe ?

Dans l'évolution de la vie, l'apparition des organismes pluricellulaires

fut une étape essentielle. On en découvre à Franceville, au Gabon, qui

auraient vécu un milliard d'années plus tôt que les autres formes de vie

complexe déjà connues (voir *Le Gabon à l'aube de la vie, page 50*).

On ignore si ces organismes pouvaient entrer dans des phases de

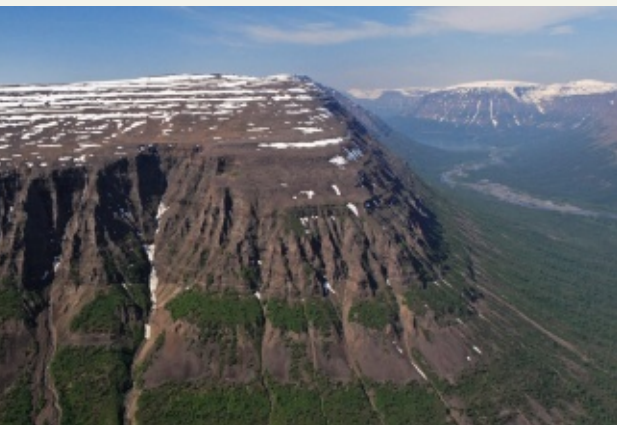
vie inactive. Une telle stratégie compliquerait encore le travail des paléon-

tologues qui cherchent à dater les extinctions d'espèces : comment

distinguer un animal mort d'un autre en état de vie inactive ? ■

1 **ÉDITO**4 **BLOC-NOTES**
Didier Nordon

Actualités

6 **La plus grande extinction
de masse enfin expliquée ?**8 **Des cellules souches
dans la rétine**10 **Des savons magnétiques**11 **La protéine FKBP52
contre Alzheimer ?**

... et bien d'autres sujets.

13 **ON EN REPARLE**

Opinions

14 **POINT DE VUE**
**Rapprocher les professeurs
de la science vivante**
*Pierre Léna*15 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
**Quand le plastique
se fait tout petit**
*Maurice Mashaal*18 **VRAI OU FAUX**
**Le Soleil va-t-il
vraiment s'éteindre ?**
Roland Lehoucq

Ce numéro comporte un encart *Pour la Science*/Salon du livre
posé en 4^e de couverture de l'édition abonnés Paris/
Île-de-France, deux encarts d'abonnement *Pour la Science*
brochés sur la totalité du tirage et une offre d'abonnement
Pour la Science p. 19.
En couverture : © MARIUS BECKER

À LA UNE

ARCHÉOLOGIE

20 **L'Égypte ancienne à l'aune
du radiocarbone***Eva Maria Wild et Walter Kutschera*

Il y a 60 ans, des objets égyptiens ont servi à mettre
au point la méthode de datation au radiocarbone.
Aujourd'hui, épaulée par la spectrométrie de masse
par accélérateur, la radiodotation contribue à résoudre
les énigmes de la chronologie égyptienne.

28 **Le casse-tête
de la chronologie égyptienne***Thomas Schneider*

Établir une chronologie fiable pour l'Égypte ancienne
est une entreprise de longue haleine. Elle se fonde
sur des données historiques nombreuses et variées,
que l'on doit aussi confronter
aux datations physiques.

34 **ASTROPHYSIQUE**
**À la recherche des trous noirs
de masse intermédiaire***Jenny Greene*

Pesant moins d'un million de masses solaires,
les trous noirs de masse intermédiaire pourraient
être la clef de l'énigme de la formation
de leurs homologues supermassifs
et des galaxies qui les abritent.

42 **BIOLOGIE**
**Toxines botuliques :
poison et médicament***César Mattei et Frédéric Meunier*

L'étude des mécanismes d'action des toxines botuliques,
responsables d'une maladie grave, le botulisme,
a permis la mise au point de traitements
de certaines maladies neuromusculaires.

50 GÉOLOGIE**Le Gabon à l'aube de la vie**

*P. Bouton, A. Prétat, D. Thiéblemont
et M. Ebang Obiang*

Les géologues ont révélé dans le sous-sol du Gabon un environnement datant d'il y a deux milliards d'années. Riche en formes de vie primitive, il aurait accueilli les premiers organismes pluricellulaires.

58 PHYSIQUE**Les gloires, des auréoles autour des ombres**

Moysés Nussenzveig

Les gloires sont des anneaux colorés qui entourent parfois les ombres projetées sur les nuages. Ce phénomène s'explique par un jeu subtil entre la lumière du Soleil et les gouttelettes d'eau en suspension.

64 MÉDECINE**Mucoviscidose : à la recherche des mutations génétiques en cause**

Steven Rowe, John Clancy et Eric Sorscher

Une meilleure compréhension des mécanismes biologiques responsables de la mucoviscidose devrait aboutir à la mise au point de nouveaux médicaments.

**70 BIOLOGIE ANIMALE****Les tardigrades, survivants de l'extrême**

William Miller

Vide spatial, températures proches du zéro absolu, rayonnements intenses : les tardigrades résistent à tout ! D'où ces petits animaux tirent-ils leurs étonnantes capacités de survie ?

Regards

78

HISTOIRE DES SCIENCES**Wurtz et l'hypothèse atomique**

Natalie Pigeard-Micault

La matière est-elle constituée d'atomes ? Tout au long du XIX^e siècle, cette question a divisé les chimistes. En France, l'acceptation de cette hypothèse fut le combat d'une vie, celle du chimiste Charles-Adolphe Wurtz.

82

LOGIQUE & CALCUL**L'impossible hasard**

Jean-Paul Delahaye

Depuis les premiers dîners, il y a trois millénaires, l'homme imagine et fabrique des objets pour produire du hasard. A-t-il réussi ?

88

ART & SCIENCE**Recette pour une mosaïque romaine**

Loïc Mangin



90

IDÉES DE PHYSIQUE**Comment éviter le coup de foudre**

*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

93

SCIENCE & GASTRONOMIE**L'eau et le feu des piments**

Hervé This

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- L'agenda des manifestations scientifiques

Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ ERREUR DE RAISONNEMENT

Quand un feu reste vert, sans qu'aucune voiture ne se présente, il ne sert à rien, qu'à gaspiller de l'énergie.

Quand un feu reste rouge sans qu'aucune voiture ne se présente, il ne sert à rien, qu'à gaspiller de l'énergie.

Quand une voiture s'arrête à un feu sans qu'aucune voiture ne passe dans la rue transversale, elle gaspille de l'énergie pour s'arrêter et elle en gaspille pour repartir.

Quand une voiture s'arrête pour qu'un piéton traverse, puis redémarre, elle gaspille une énergie qui aurait été économisée si la voiture avait laissé au piéton le soin tout naturel de faire un brusque saut en arrière pour éviter d'être renversé.

Les économies d'énergie commandent donc que l'on supprime les feux de circulation et que l'on confère aux voitures une priorité permanente sur les piétons.

→ CONTORSION MENTALE

Quiconque a l'âge suffisant a connu la dissertation littéraire en trois points. Le professeur proposait quelque forte pensée (par exemple : « Le secret de Rabelais, c'est qu'il n'a pas de secret »), et l'élève devait la discuter selon un plan en trois parties. Thèse : la phrase est d'une belle pertinence. Puis antithèse : la phrase est irrecevable. Après quoi, restait à réussir une contorsion intellectuelle réconciliant la thèse et l'antithèse en une irréprochable synthèse.

Je croyais cet exercice dépourvu d'applications pratiques, mais la SNCF vient d'élargir mes horizons. À peine étais-je installé, que le contrôleur avertissait les passagers : suite à des travaux sur les voies, notre TGV n'arriverait pas à 14h22, comme annoncé, mais à 14h52. En fait, il est arrivé à 14h42. La question se pose alors de savoir s'il était en retard ou en avance.

Répondons comme la dissertation littéraire nous a appris à faire. Thèse : il faut juger d'après l'horaire initialement annoncé, donc le TGV a eu 25 minutes de

retard. Antithèse : il faut juger d'après l'horaire rectifié, donc le TGV a eu 5 minutes d'avance. Synthèse : le TGV est arrivé avec une avance de 5 minutes sur son retard de 30 minutes.



→ CETTE OBSCURE CLARTÉ...

Le mot « dimension » possède, en mathématiques, un nombre impressionnant d'acceptions différentes : dimension vectorielle, dimension topologique, dimension fractale, dimension de corrélation, dimension de Hausdorff, dimension de Minkowski... Bien que chacune soit une interprétation de la notion familière de dimension, ces acceptions sont toutes distinctes. Pourquoi les mathématiciens les multiplient-elles ainsi ? Parce que c'est le prix à payer pour être précis. À outil précis, usage circonscrit. Aucune définition précise de la dimension n'est adaptée à l'ensemble des mathématiques. Chaque type de problème appelle une interprétation spécifique.

Du coup, quelqu'un qui, de l'extérieur, demanderait aux mathématiciens quelle idée elles ont de la notion de dimension recevrait trop de réponses pour être éclairé. Les mathématiciens empruntent au langage courant une notion vague, et en font une notion dotée de tant de sens précis que le vague reste aussi présent qu'avant l'emprunt. Les précisions sont ennemies de la précision.

→ QUELQUES D'AUCUNS

En faisant dire à un personnage « Je ne me satisfais d'aucunes conjectures » (Horace, l, l), Corneille n'imaginait probablement pas qu'il forgeait une maxime parfaite pour un mathématicien. Le pluriel « aucunes » est étrange, mais soit : la langue a évolué depuis le XVII^e siècle.

Pourtant, notre temps offre des exemples analogues. Lorsque l'ancien ministre Luc Ferry a accusé un autre ancien ministre, dont il a tu le nom, de s'être fait « poisser dans une partouze pédophile », *Le Monde* a écrit qu'il ne révélerait pas ce nom, parce qu'il ne disposait « d'aucuns éléments » étayant les accusations. Sans doute faut-il comprendre que le journal avait des éléments (pluriel !), mais qu'aucun (singulier !) ne lui paraissait assez solide pour gagner le procès que la publication du nom entraînerait. Du point de vue de la grammaire, toutefois, le journal est irréprochable. Selon le *Grand Robert*, en effet : « Le pluriel aucuns est rare, mais il est toléré (Arrêté ministériel du 26 février 1901) ». Ce dont on déduit au passage que les ministres, en 1901, se consacraient à des affaires sérieuses, eux.

Autre pluriel inattendu, celui du mot « tout ». Voici un exemple. Après avoir espéré construire une théorie du tout, grâce à la théorie des cordes, les physiciens ont été contraints de constater que les paramètres à fixer sont trop nombreux, si bien « qu'on est passé de la théorie du tout à la théorie des touts, c'est-à-dire à un nombre gigantesque de solutions possibles de la théorie des cordes à basse énergie » (Jean-



Philippe Uzan, dans *Multivers*, Ed. La ville brûle, 2010, p. 128].

Bref, la physique ne se satisfait d'aucuns tous.

→ PETIT RIEN DEVIENDRA GRAND

Pour en imposer à l'auditoire devant lequel vous prononcez une conférence sur un sujet général, un bon procédé est d'illustrer celle-ci par un événement récent et inopiné. Citez, par exemple, un fait rapporté « ce matin même » par la presse, ou un slogan d'une affiche que vous avez vue en vous rendant à la conférence, ou un incident de rue dont vous venez d'être témoin.



Vous montrez ainsi que vos propos rendent compte de la vie quotidienne. Votre puissance se manifeste avec éclat, puisque votre intellect toujours en alerte vous permet d'analyser un détail auquel, probablement, personne d'autre n'aurait songé à trouver un sens. En insérant ce menu fait dans une vaste perspective, vous lui donnez une stature inattendue – et à vous aussi, du coup. Veillez à mentionner le fait sans avoir l'air d'y toucher, en passant : utiliser votre théorie dans un cas concret est tout naturel.

Je ne sais si ce procédé a déjà été formalisé explicitement. Si oui, il figure à coup sûr parmi les trucs proposés par les livres censés révéler les clés du succès. En tout cas, son utilisation spontanée est fréquente. Figurez-vous d'ailleurs que j'ai entendu, ce matin même, un conférencier l'employer alors que je venais de le choisir comme sujet de cette chronique...

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

CTHS Sciences



François Péron

Voyage de découvertes aux Terres australes

Tome II

Voyage de découvertes aux Terres australes

François Péron

édité par Jacqueline Goy

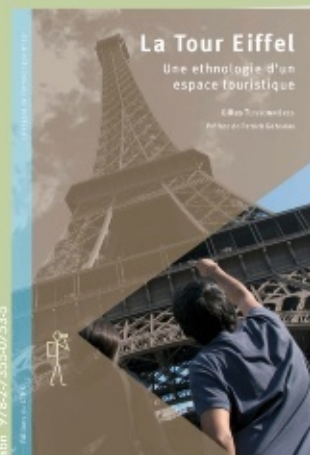
vol. 1, 496 pages

vol. 2, 471 pages

15 x 22 cm

45 €

Le regard de l'ethnologue



La tour Eiffel

Une ethnologie d'un espace touristique

Gilles Teissonnières

368 pages

ill. noir et blanc

16 x 24 cm

28 €

Orientations et méthodes



Les anciennes mesures du Centre historique de la France d'après les tables de conversion sous la direction de Pierre Charbonnier

352 pages

17 x 22 cm

35 €

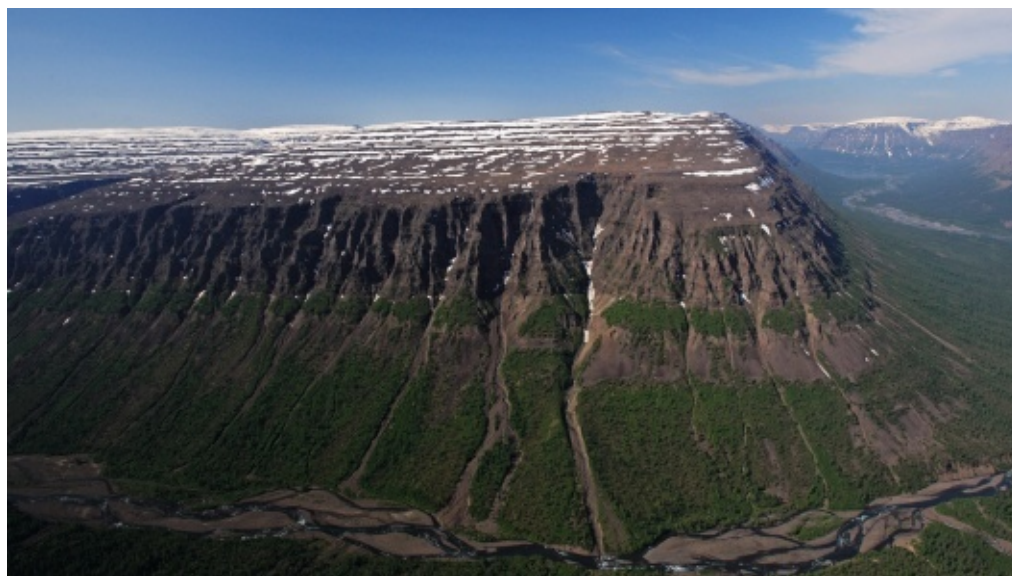
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

Sciences de la Terre

La plus grande extinction de masse enfin expliquée ?

Il y a 250 millions d'années, un supervolcan sibérien a rempli l'atmosphère de cendres, provoqué des pluies acides, détruit la couche d'ozone et aurait empoisonné les océans avec du mercure.

Les trapps de Sibérie (*ci-contre*) sont des épanchements volcaniques datant de la fin du Permien, il y a 250 millions d'années. Ils couvrent une immense superficie et leur épaisseur atteint plusieurs kilomètres. Ce volcanisme massif aurait conduit, *via* le craquage des pétroles présents à l'époque, à la libération de grandes quantités de mercure. Cet élément aurait empoisonné les océans et contribué à la disparition de 95 pour cent des espèces marines, tels les trilobites (*ci-dessous*).



© SHUTTER/COMPTON/LOOK CORIS



© MOUSSE DIRECT LIA

A la fin du Permien (ère allant de 299 à 251 millions d'années), 70 pour cent des espèces terrestres et 95 pour cent des espèces marines ont disparu. Nommée crise fini-permienne, cette extinction de masse est la plus grande connue. Quelles sont ses causes ? Les hypothèses vont de la formation du supercontinent géant de la Pangée aux impacts météoritiques, en passant par le supervolcanisme. Selon les conclusions complémentaires de plusieurs équipes, la pollution atmosphérique provoquée par un supervolcan serait le facteur clef de l'extinction de masse.

Nommés trapps, les épanchements basaltiques sibériens commencent juste derrière l'Oural et couvrent plus de trois fois la superficie de la France. Actif pendant plus d'un million d'années, ce volcanisme massif a déposé des couches épaisses de plusieurs kilomètres et a pollué l'atmosphère. Pour préciser comment, Benjamin Black, du MIT, a étudié les proportions des divers gaz figés au sein des inclusions

vitreuses des falaises de laves sibériennes. Les teneurs mesurées suggèrent que 8 700 gigatonnes de chlore, 7 800 gigatonnes de soufre et entre 7 100 et 13 800 gigatonnes de fluor ont été émises dans l'atmosphère. De quoi produire des pluies acides et contribuer à un changement climatique.

De fait, un réchauffement brutal a été enclenché par la libération d'énormes quantités de dioxyde de carbone et d'hydrocarbures halogénés, destructeurs de la couche d'ozone. Henrik Svensen, de l'Université d'Oslo, et ses collègues l'ont établi en 2009, en montrant que l'arrivée du magma a provoqué un craquage massif de la matière organique contenue dans les sédiments de l'immense bassin sédimentaire de la Toundra. Le dégazage intense qui s'en est suivi s'est traduit par la formation de 6 400 cratères de plusieurs kilomètres de diamètre.

Impressionnant ? La situation fut pire encore ! Hamed Sanei et ses collègues de l'Université de Calgary, au Canada, viennent

d'examiner le rôle du mercure produit par le craquage des pétroles et autres fuels fossilisés de la Toundra. Ce mercure a été accumulé de leur vivant par les organismes à l'origine du pétrole. L'analyse du contenu d'une pile sédimentaire du haut arctique canadien a révélé que durant la crise fini-permienne, la concentration du mercure atmosphérique a atteint 30 fois la concentration actuelle. Or le mercure tend à s'accumuler dans les algues, qui sont à la base de la chaîne alimentaire océanique.

En résumé, le supervolcanisme sibérien de la fin du Permien a enclenché un réchauffement climatique brutal, a fait disparaître la couche d'ozone et a fortement acidifié les pluies. Cela peut sans doute expliquer l'extinction de 70 pour cent des espèces terrestres, mais pas celle de 95 pour cent des espèces marines. Là, un facteur supplémentaire était nécessaire : l'empoisonnement des océans par le mercure ?

→ François Savatier

Geology, vol. 40(1), pp. 63-66, 2012

Zoologie

Le poisson qui imite la pieuvre imitatrice

La palme de l'imitation revient sans doute à la pieuvre mimétique (*Thaumoctopus mimicus*) qui vit dans les eaux indonésiennes : selon la disposition de ses tentacules, sa couleur (modifiable) et son déplacement, l'animal ressemble à un serpent de mer, à une rascasse volante, à un crabe, à une raie, à une méduse... Face à une telle palette de déguisements, on imaginait mal un animal pouvant prendre cette pieuvre comme modèle pour à son tour se camoufler. Pourtant, L. A. Rocha, de l'Académie californienne des sciences, et ses collègues ont découvert un poisson qui se protège des prédateurs en imitant la pieuvre mimétique ! Il s'agit du poisson *Stalix histrio*, qui a une livrée semblable : du brun ou du noir strié de beige ou de blanc. Les poissons de la famille de *Stalix histrio* sont de piètres nageurs et s'aventurent rarement en dehors de leur refuge. En revanche,



La pieuvre mimétique, *Thaumoctopus mimicus*, peut imiter plusieurs animaux différents. Le poisson *Stalix histrio* (flèche) a, lui, une livrée très semblable.

Stalix histrio passe du temps entre les tentacules de la pieuvre parmi lesquels il se fond pour explorer un plus grand territoire, à la recherche de nourriture.

→ Loïc Mangin

L. A. Rocha et al., *Coral Reefs*, à paraître, 2012

En bref

DE LA GLACE SUR VESTA ?

L'astéroïde géant Vesta est considéré comme aride : faute de zone d'ombre permanente à sa surface, l'eau s'évaporerait inévitablement sous l'effet du rayonnement solaire. Cette idée est remise en cause par le premier modèle des températures de surface de Vesta, établi par deux chercheurs américains. Près des pôles, la température moyenne est de -128°C . Dès lors, de la glace d'eau piégée dans les premiers mètres du sol échapperait à la photoévaporation.

LA DANSE DU BOUSIER

C'est la cohue autour d'une bouse fraîche ! Un scarabée (un bousier) confectionne une pelote sphérique et la fait rouler. Avant de partir, l'insecte grimpe sur son butin et tourne dessus. Il referra plusieurs fois cette danse. Pourquoi ? Des biologistes suédois et sud-africains ont montré que ce comportement est déclenché quand le scarabée perd le contrôle de sa boule. De la sorte, l'insecte se réoriente par rapport au Soleil et peut s'éloigner au mieux, c'est-à-dire en ligne droite, de ses congénères, possibles concurrents.

DES ORCHIDÉES EXIGEANTES

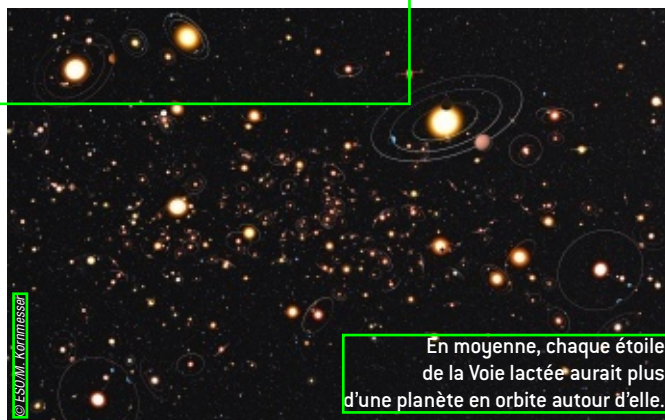
Des biologistes américains ont montré que des sols de forêts anciennes, riches en bois mort, sont favorables au développement de certains champignons microscopiques, lesquels vivent en symbiose avec les orchidées et apportent aux fleurs les nutriments indispensables dans les premiers stades de leur développement. Les interactions des orchidées avec leur environnement reposent sur un équilibre complexe et fragile, mis en danger par l'exploitation des forêts.

Astronomie

Plus de 100 milliards de planètes dans la Voie lactée

On connaît aujourd'hui moins de 800 exoplanètes – des planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Ce nombre paraît bien faible par rapport au nombre d'étoiles. Est-ce à dire que les étoiles ayant des planètes sont rares ? Non, selon Arnaud Cassan, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et ses collègues : leur analyse statistique des résultats de six ans d'observations a montré qu'il y a plus d'une planète par étoile en moyenne dans notre Galaxie, soit plus de 100 milliards de planètes au total !

Les observations examinées concernent des événements dits de microlentille gravitationnelle, lors desquels la lumière issue d'une étoile lointaine est focalisée par une autre étoile, parfois accompagnée de planètes, qui passe entre elle et la Terre. L'analyse de la luminosité de l'étoile lointaine permet de reconstituer les caractéristiques de l'objet défecteur. Plusieurs centaines d'événements de ce type – et donc d'étoiles défectrices – ont été



En moyenne, chaque étoile de la Voie lactée aurait plus d'une planète en orbite autour d'elle.

suivis en détail. Cet échantillon étant assez important et intrinsèquement aléatoire, il est supposé représentatif des étoiles de la Galaxie.

Une dizaine d'exoplanètes ont été détectées pour cet échantillon. Pour en déduire leur abondance réelle, les astrophysiciens ont estimé la sensibilité de la détection : si l'on observe par exemple trois planètes et que, lorsqu'une planète est présente, on a une chance sur

quatre de la détecter, on en conclut qu'il existe environ 12 planètes.

Ils ont montré qu'en moyenne, à chaque étoile de la Voie lactée est associée 1,6 planète. Et leur estimation ne concerne que les planètes assez grosses et situées entre 0,5 et 10 unités astronomiques de leur étoile : les plus de 100 milliards de planètes annoncées ne sont donc qu'une borne inférieure !

→ Guillaume Jacquemont

Nature, vol. 481, pp. 167-169, 2012

En bref

LE PLUS PETIT VERTÈBRE



Paedophryne amauensis est une toute petite grenouille, dont la taille moyenne est de 7,7 millimètres. Les premiers spécimens ont été collectés en 2009 près du village d'Amau, en Papouasie-Nouvelle-Guinée. L'espèce vient d'être décrite et nommée. Ce batracien, qui occupe la moitié du diamètre d'une pièce de un centime d'euro, est désormais le plus petit vertébré connu.

UN AMAS GALACTIQUE NAÎT

Des astronomes de la NASA ont découvert, grâce au télescope spatial *Hubble*, cinq galaxies distantes de 13,1 milliards d'années-lumière et liées par la force gravitationnelle. Les simulations indiquent que ces jeunes galaxies devraient fusionner en un seul objet, semblable à la galaxie elliptique géante M87, et ainsi constituer le noyau d'un amas qui contiendra, à terme, plusieurs centaines de galaxies.



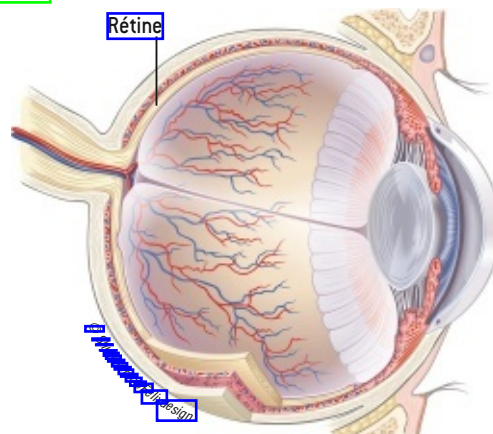
Le caractère influençable des adolescents serait lié au fait que leur striatum dorsal s'active plus que celui des adultes, lorsqu'ils songent à la récompense espérée.

Biologie cellulaire

Des cellules souches dans la rétine

Saurons-nous un jour régénérer les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine, dont le dysfonctionnement est à l'origine de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) ? C'est ce que laissent entrevoir les travaux de l'équipe de Sally Temple, de l'Institut des cellules souches neuronales de Rensselaer, aux États-Unis. En cultivant sous diverses conditions de telles cellules prélevées sur des donneurs décédés, les biologistes ont mis en évidence une sous-population de cellules souches multipotentes, c'est-à-dire capables de se différencier en plusieurs types cellulaires – dont les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine.

Ces cellules qui tapissent le fond de la rétine assurent le bon fonctionnement des cellules photoréceptrices de l'œil. La DMLA, principale cause de malvoyance et de cécité dans les pays industrialisés – elle y touche sept pour cent des personnes de plus de 75 ans –, est due à leur disparition progressive. Il n'existe encore aucun traitement pour la forme la plus fréquente, dite DMLA « sèche » ou atrophique. Une piste consiste à greffer dans la rétine des cellules de l'épithélium pigmentaire produites en laboratoire à partir de cellules souches embryonnaires ou de cellules induites à la pluripotence. Ces cellules sont



La dégénérescence maculaire liée à l'âge détruit les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine, une couche de cellules qui tapisse le fond de la rétine.

capables de se différencier en cellules de n'importe lequel des trois feuillets embryonnaires qui produisent les organes d'un individu. Cette stratégie est toutefois délicate, car, de par leur pluripotence, ces cellules peuvent engendrer des tumeurs.

Les cellules souches découvertes dans l'épithélium pigmentaire suggèrent une nouvelle voie : en culture, sous certaines conditions, elles se différencient en cellules de l'épithélium pigmentaire. Existerait-il des conditions similaires qui activeraient leur différenciation dans la rétine des personnes atteintes de la maladie, et ainsi la régénération *in situ* de l'épithélium défectueux ? Prochaine étape : décortiquer le mécanisme qui active leur différenciation.

→ Marie-Neige Cordonnier

E. Salero et al., *Cell Stem Cell*, vol. 10, pp. 88-95, 2012

Neurosciences

Les adolescents, plus avides de récompense

Chez l'adolescent, le cerveau est encore en formation, ce qui expliquerait certains comportements jugés immatures. David Sturman et Bitu Moghadam, de l'Université de Pittsburgh aux États-Unis, ajoutent une pierre à l'édifice : ils ont montré chez le rat qu'une partie du striatum des adolescents, une région cérébrale profonde, ne réagit pas comme celle des adultes quand ils s'agit d'anticiper une récompense.

Ces neurobiologistes ont enregistré l'activité des neurones de rats pendant que les animaux réalisaient une tâche faisant intervenir une récompense. Des rats de deux groupes, des « adolescents » âgés de 21 jours et des « adultes » de plus de 60 jours, ont été placés

dans une cage face à un mur comportant trois trous. Une ampoule était allumée au-dessus d'un des trous, et quand elle s'éteignait, si le rat introduisait son museau dans ce trou, une récompense (de la nourriture) sortait du mur opposé.

Durant cette tâche, chaque rat avait des électrodes implantées dans deux régions cérébrales : le striatum dorsal et le noyau accumbens. Ce dernier détermine notamment la valeur (bonne ou mauvaise) des récompenses, tandis que le striatum dorsal intervient dans le choix d'une action selon la récompense.

Les chercheurs n'ont observé aucune différence d'activité électrique dans le noyau accumbens des rats adolescents et adultes. Cela

suggère que les adolescents ne prennent pas plus de plaisir que les adultes à une récompense donnée. En revanche, davantage de neurones s'activent dans le striatum dorsal des adolescents, comparé à celui des adultes, au moment où les animaux anticipent l'arrivée de la récompense. Cela signifie que le comportement des rats adolescents est plus influencé par les récompenses espérées – qu'elles soient positives ou négatives – que celui des adultes. Les adolescents seraient ainsi plus influençables que les adultes parce qu'ils sont plus sensibles aux récompenses – ou aux punitions – qu'ils pensent recevoir...

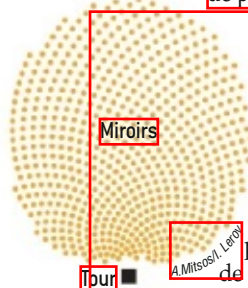
→ Bénédicte Salthun-Lassalle

PNAS, en ligne, 17 janvier 2012

Énergie

Centrales solaires inspirées

Près de Séville, en Espagne, 624 miroirs renvoient la lumière du Soleil vers le sommet d'une tour, où un dispositif convertit la chaleur accumulée en électricité. Il s'agit de PS10, la première centrale solaire commerciale d'Europe. Alexander Mitsos, du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), et ses collègues ont développé un programme pour déterminer la disposition optimale des miroirs, celle qui améliore le rendement et occupe le moins de place au sol.



Miroirs

A. Mitsos / Le Figaro

En partant de la configuration « radiale » de PS10 avec des miroirs placés sur des cercles concentriques et décalés d'un rang à l'autre, les ingénieurs ont calculé le meilleur compromis entre la concentration des miroirs dans les zones avec le meilleur rendement – au pied de la tour – et l'ombre que se font les miroirs. Les ingénieurs ont déterminé que la meilleure configuration radiale présentait des motifs en spirales, comme les fleurs de tournesol. En remplaçant la configuration radiale par un schéma spiralé (ci-contre), ils ont réduit la surface occupée de 16 pour cent en gardant un rendement équivalent à celui de la configuration initiale de PS10.

→ Sean Bailey

C. J. Noone et al., *Solar Energy*, vol. 86(2), pp. 792-803, 2012

Écologie

Le vent tourne pour l'albatros



© P. INRA

L'albatros hurleur (*Diomedea exulans*) passe le plus clair de son temps en vol, porté par le vent, à la recherche de nourriture. Or le régime des vents est modifié par le réchauffement climatique. Quelles sont les conséquences pour les oiseaux ? Henri Weimerskirch, du Centre d'études biologiques de Chizé (CNRS), et ses collègues ont montré que les effets sont aujourd'hui bénéfiques, mais que cela ne devrait pas durer...

Aujourd'hui, dans l'océan Austral, autour de l'Antarctique, les vents d'Ouest, d'une part, ont accéléré et, d'autre part, se sont rapprochés du continent glacé. Les albatros en profitent : ils se déplacent plus vite. Les économies d'énergie réalisées se traduisent par une augmentation du poids moyen des oiseaux.

Cependant, selon la plupart des scénarios, les vents d'Ouest vont continuer de se déplacer vers le Sud. Ce faisant, alors qu'ils soufflent encore sur les îles Crozet où nichent les albatros, ils s'éloigneront de l'archipel dans quelques décennies. Dès lors, les oiseaux seront cette fois pénalisés.

→ L. M.

H. Weimerskirch et al., *Science*, vol. 335, pp. 211-214, 2012

Transports

Voitures : un tiers de pertes d'énergie par les frottements

On estime à environ 612 millions le nombre de voitures particulières en circulation aujourd'hui dans le monde. Cela représente une consommation d'énergie d'origine fossile (essence et diesel) importante. Pourrait-on la réduire notablement, à nombre de véhicules constant ? Kenneth Holmberg et Peter Andersson, du Centre de recherche technique VTI de Finlande, avec Ali Erdemir, du Laboratoire américain d'Argonne, dans l'Illinois, répondent oui.

En analysant les différentes études scientifiques et techniques disponibles, les trois chercheurs ont calculé l'énergie qu'utilise une voiture particulière pour surmonter les divers frottements au niveau du moteur, de l'arbre de transmission, des pneus ou des freins. Ils trouvent qu'un tiers de l'énergie du carburant est dépensé pour cela. Les pertes directes par frottement, en excluant le freinage, correspondent à 28 pour cent de l'énergie consommée, tandis que seuls 21,5 pour cent de l'énergie servent à la propulsion proprement dite du véhicule.

Plus précisément, l'énergie du carburant est dépensée dans un premier temps pour déployer de la puissance mécanique (38 pour cent), pour le refroidissement (29 pour cent) et pour l'échappement des gaz (33 pour cent). La puissance mécanique sert à vaincre

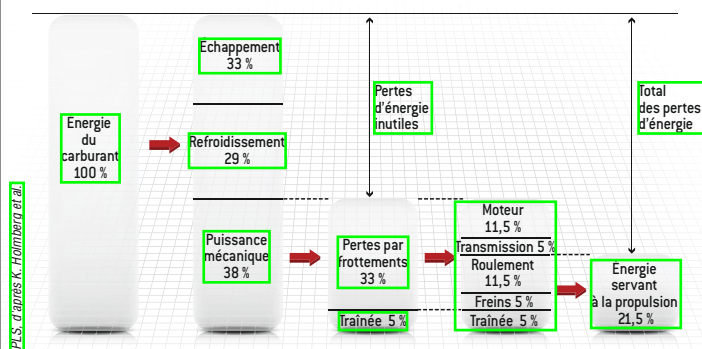
les frottements solides (33 pour cent) et la traînée aérodynamique (5 pour cent). Les pertes par frottements solides se ventilent en pertes dans le moteur (11,5 pour cent), dans les transmissions (5 pour cent), dans le roulement (11,5 pour cent) et dans les freins (5 pour cent). La part servant à la propulsion (roulement, freins et traînée aérodynamique) est donc égale à $11,5 + 5 + 5 = 21,5$ pour cent de l'énergie du carburant.

K. Holmberg et ses deux collègues évaluent à 340 litres par an la quantité de carburant utilisée aujourd'hui en moyenne par une voiture particulière pour vaincre les frottements. Cela correspond à une dépense de 510 euros par an (prix de 2011). Au niveau mondial, c'est 631 milliards de litres par an, dont 210 milliards dévolus aux frottements.

Les meilleures techniques disponibles aujourd'hui pourraient diminuer les pertes par frottement de 42 pour cent, et la consommation de carburant de 37 pour cent. Avec les meilleures solutions en cours de développement dans les laboratoires, la consommation de carburant baisserait de 61 pour cent, ce qui économiserait 580 milliards d'euros par an ! Et l'on émettrait 960 millions de tonnes de dioxyde de carbone en moins par an...

→ Maurice Mashaal

Tribology International, en ligne, 6 décembre 2011



Un tiers de l'énergie du carburant sert à surmonter les frottements.

En réduisant ceux-ci, la consommation diminuerait considérablement.

Écologie

L'invasion du python birman

Depuis le milieu des années 1990, le python birman (*Python molurus bivittatus*) est une espèce invasive en Floride, et notamment dans le parc national des Everglades, au Sud de l'État. Kristen Hart, du Service géologique des États-Unis (USGS) et ses collègues révèlent que cette intrusion entraîne un grave déclin des populations de mammifères.

En Floride, le reptile, qui peut atteindre plus de six mètres de longueur, s'attaque aux oiseaux, aux alligators ainsi qu'aux mammifères. Le raton-laveur, l'opossum de Virginie et les lapins ont quasiment disparu du parc. Ces mammifères sont plus nombreux dans les zones où le python birman a été détecté récemment et sont les plus abondants dans les régions où le reptile est encore absent. Le lynx roux, le renard et le cerf de Virginie se sont également raréfiés depuis l'arrivée du reptile. Et selon une étude publiée en février 2008, l'USGS prévoit qu'à la fin du XXI^e siècle, l'aire du python birman couvrira le tiers des États-Unis...

→ L. M.

M. Dorcas et al., PNAS, à paraître, 2012



Un python birman enserrant un jeune alligator.

© SHUTTERSTOCK/MIRO AGEE

Neurobiologie

Dyslexie : dépistage précoce ?

En France, environ un enfant sur dix présente des difficultés pour lire. Ce trouble, la dyslexie, existerait avant l'apprentissage de la lecture et pourrait être dépisté... si l'on disposait des outils adéquats. C'est ce que confirment Nora Raschle, de l'Hôpital pour enfants de Boston, et ses collègues, grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Les régions cérébrales impliquées lors de la lecture sont réparties dans tout le cerveau, mais on peut isoler un circuit occipito-temporal gauche et un circuit pariéto-temporal gauche. Le premier participe au traitement des unités graphiques et à leur mise en correspondance avec les unités sonores constituant les mots. Le second est impliqué dans la reconnaissance lexicale et dans le traitement des séquences phonologiques. Les neurobiologistes américains ont mesuré l'activité de ces régions chez 36 enfants âgés de 5 à 6 ans et ne sachant pas lire, pendant qu'ils réalisaient des exercices de phonologie, par exemple trouver les deux mots qui riment parmi les trois proposés. Ils ont observé une diminution d'activité de ces régions uniquement chez les enfants qui risquent de souffrir de dyslexie (car leurs parents en souffrent et la dyslexie est en partie héréditaire). Ces hypoactivités cérébrales, antérieures à l'apprentissage de la lecture, pourraient aider à diagnostiquer précocement la dyslexie.

→ B. S.-L.

N. Raschle et al., PNAS, en ligne, 23 janvier 2012

Chimie

Des savons magnétiques

Une équipe menée par Julian Eastoe, de l'Université de Bristol, a synthétisé des molécules de savon qui sont sensibles à un champ magnétique. De telles substances ouvrent la voie au contrôle d'émulsions liquides simplement en appliquant un champ magnétique externe.

Les molécules de savon sont des surfactants, qui ont une partie hydrophile (attirée par les molécules d'eau) et une partie hydrophobe. De ce fait, elles réduisent la tension de surface entre l'eau et, par exemple, l'huile en se plaçant à l'interface des deux liquides, leur partie hydrophile dirigée vers l'eau et leur partie hydrophobe dirigée vers l'huile. Cela leur permet de dissoudre l'huile : les molécules de surfactant, ou tensioactifs, rendent l'interface eau-huile beaucoup plus élastique, ce qui permet à l'huile de se disperser en de nombreuses petites gouttelettes, séparées de l'eau par des molécules de savon.

L'équipe de J. Eastoe a réussi à incorporer des ions magnétiques tels que FeCl_4^- ou FeCl_3Br^- à des molécules tensioactives. En l'absence de champ magnétique externe, les nouvelles molécules sont déjà plus efficaces que les surfactants dont elles sont issues ; en d'autres termes, elles réduisent davantage la tension de surface. Et quand un champ magnétique est appliqué, la tension de surface subit une réduction supplémentaire : avec un aimant de 0,4 tesla placé à un millimètre d'une solution aqueuse

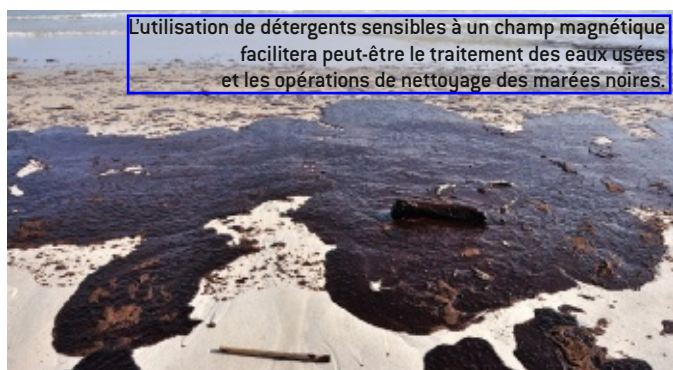
de savon, la tension de surface est réduite de près de dix pour cent.

La caractérisation structurale des solutions de ces savons a été effectuée à l'Institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble, par la technique de diffusion de neutrons aux petits angles. Comme les tensioactifs de départ, les molécules modifiées forment de petits agrégats nommés micelles, où la partie centrale est occupée par les chaînes hydrophobes, protégées du contact de l'eau par les têtes polaires hydrophiles. « Nous avons montré que ces savons modifiés gardent leurs propriétés d'auto-assemblage, donc de nettoyage, et avons caractérisé la taille des micelles formées », indique Isabelle Grillo, responsable des laboratoires de chimie à l'ILL et cosignataire de l'étude.

Jusqu'ici, on arrivait à modifier les propriétés physico-chimiques (hydrophobie, conductivité électrique, point de fusion, etc.) de solutions de surfactants en modifiant le pH, la température, la pression... Mais cela conduisait à des changements irréversibles ou exigeait beaucoup d'énergie. Les savons magnétiques offrent la possibilité de changements réversibles via l'application d'un champ externe. On envisage ainsi des savons pouvant être récupérés avec un aimant après avoir agi, ce qui serait intéressant par exemple dans les opérations de traitement des marées noires. Pour l'instant, on en est loin...

→ M. M.

Angewandte Chemie, en ligne, 20 janvier 2012



L'utilisation de détergents sensibles à un champ magnétique facilitera peut-être le traitement des eaux usées et les opérations de nettoyage des marées noires.

© SHUTTERSTOCK/MIRO AGEE

Neurobiologie

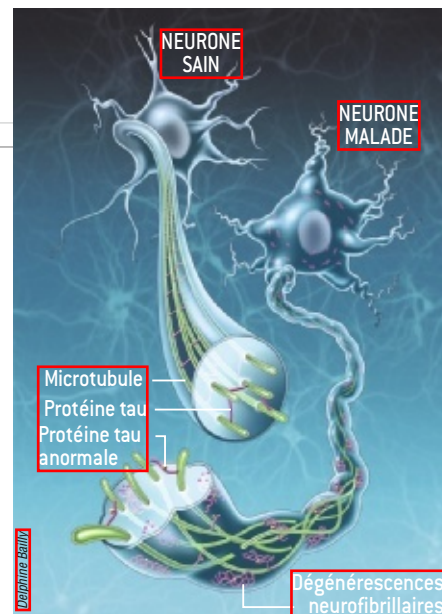
La protéine FKBP52 contre Alzheimer ?

L'accumulation dans les neurones d'une forme anormale de la protéine tau est associée à des démences nommées tauopathies, qui se développent avec l'âge et dont la maladie d'Alzheimer est la plus fréquente. D'où l'idée de détruire la protéine tau anormale pour protéger les neurones. En 2010, Étienne-Émile Baulieu et ses collègues, de l'Institut Baulieu à Paris, ont découvert une protéine naturelle, FKBP52, qui se lie à la protéine tau. Ils montrent aujourd'hui que cette protéine est absente du cerveau de patients décédés d'une tauopathie. Pourrait-elle servir d'arme contre les protéines tau anormales ?

La protéine tau (*tubulin associated unit*) participe au fonctionnement des neurones en interagissant avec des filaments cellulaires nommés microtubules (constitués de tubuline). Quand elle est anormale, elle s'agrège et forme des lésions particulières nommées dégénérescences neurofibrillaires. Les neurones des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer présentent

ainsi de nombreuses dégénérescences neurofibrillaires, et des plaques dites amyloïdes se forment à l'extérieur des neurones (mais on ignore le lien entre les deux anomalies). De nombreux chercheurs étudient les plaques amyloïdes dans l'espoir de les détruire et de préserver les neurones. L'équipe de É.-É. Baulieu, elle, s'intéresse aux protéines tau anormales.

En 2010, elle a découvert un partenaire de la protéine tau normale dans les neurones : la protéine FKBP52. Cette dernière s'oppose à l'accumulation des protéines tau anormales dans des cellules en culture, et elle en diminue l'effet toxique vis-à-vis des neurones. É.-É. Baulieu et ses collègues ont montré désormais que la quantité de protéine FKBP52 est diminuée de 75 pour cent environ dans le cerveau de patients décédés d'une tauopathie, y compris d'une maladie d'Alzheimer, comparé au cerveau de personnes décédées d'une autre maladie. Et moins cette protéine est exprimée, plus les neurones contiennent de protéines tau anormales.



Quand des agrégats de protéines tau anormales (dégénérescences neurofibrillaires) s'accumulent dans les neurones, les microtubules des neurones sont déstabilisés.

Dès lors, la protéine FKBP52 participerait au fonctionnement normal de la protéine tau. Comment interagissent-elles ? Peut-on moduler l'expression de FKBP52 et en faire une arme capable de détruire les protéines tau anormales ? Des années de recherches seront nécessaires pour répondre à ces questions.

→ B. S.-L.

J. Guistiani et al., J. of Alzheimer's Disease, en ligne, 10 janvier 2012

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Partagez les savoirs

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur
www.jardindesplantes.net
dans "l'agenda du jardin"

UN CHERCHEUR/UN LIVRE

Lundi 5 mars – 18h, Le patrimoine géologique
Éd. du Muséum. Invité : P. De Wever, professeur, géologue, Dép. Histoire de la Terre, Muséum

CONFÉRENCES

Cycle : "Centenaire de la Ligue pour la Protection des Oiseaux"
Lundi 12 Mars – 18h
Les naturalistes, entre désir de connaître et besoin d'admirer
B. Alliot, docteur en science politique et ingénieur de recherche à l'université Paris-Est, administrateur de la LPO

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e - Métro : Jussieu

BAR DES SCIENCES

Mercredi 21 mars – 19h30
Évaluer la biodiversité, agir pour sa préservation
J.-P. Le Duc, délégué aux affaires européennes et internationales, Muséum et J.-Ph. Siblet, directeur du Service du Patrimoine naturel du Muséum

Café restaurant la Baleine 47 rue Cuvier, Paris 5^e – Métro : Jussieu

LES COURS PUBLICS

Cycle : "Le processus de l'évolution biologique"
Jeudi 29 mars – 18h
La variation : pourquoi chaque être est unique
M. Veille, directeur d'étude à l'EPHE, UMR Origine, structure et évolution de la biodiversité, Muséum/CNRS

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e – Métro : Jussieu

Paléontologie humaine

De l'ocre néandertalien

Wil Roebroeks, de l'Université de Leyde, et des confrères ont étudié de près une trouvaille faite par les fouilleurs du site néandertalien du Belvédère à Maastricht: 15 minuscules taches rouges tranchant sur le sédiment limoneux déposé par l'ancienne Meuse, il y a quelque 250 000 ans. D'une part, l'analyse chimique prouve qu'il s'agit là d'un matériau riche en oxyde de fer, bref d'un ocre, qui n'a pu être apporté là que depuis un site distant. D'autre part, les reconstitutions suggèrent que l'ocre a pénétré dans le sédiment parce qu'on y a versé un liquide coloré. Un Néandertalien aurait-il répandu le liquide sur son corps pour l'orner d'un rouge symbolique? Il est tentant de le penser, mais rien ne le prouve. Si c'était le cas, nous aurions une trace de pensée symbolique chez les Néandertaliens, quelque 170 000 ans avant l'apparition de traces comparables chez *Homo sapiens*, en Afrique. Une chose au moins est sûre: réserver la primeur de la cognition moderne à *Homo sapiens*, c'est prendre le risque d'un préjugé!

→ F. S.

W. Roebroeks et al., PNAS, en ligne, 23 janvier 2012

Physique

Graphène et mouillage

Le graphène est un feuillet de carbone d'épaisseur monoatomique, où les atomes de carbone sont liés de façon à former un réseau hexagonal, en nid-d'abeilles. Les trous de ce grillage moléculaire sont trop petits pour laisser passer des molécules d'eau. Pourtant, une équipe menée par Pulickel Ajayan et Nikhil Koratkar, à l'Institut polytechnique Rensselaer et à l'Université Rice, aux États-Unis, a montré que les propriétés de mouillage de la surface recouverte sont presque inchangées lorsque les principales interactions de l'eau avec la surface sont les forces intermoléculaires dites de van der Waals. Ainsi, l'angle formé entre le bord d'une goutte d'eau et un support en or, en cuivre, en silicium, etc. (mais pas en verre...) est très peu modifié lorsqu'on intercale un feuillet de graphène. La raison est liée au fait que les forces de van der Waals, bien que faibles, ont une portée supérieure à l'épaisseur du graphène. Une «transparence au mouillage» qui sera utile pour divers types de revêtements.

→ M. M.

J. Rafiee et al., Nature Materials, en ligne, 22 janvier 2012

Physiologie

Exacerber l'immunité

L'équipe d'Éric Vivier et Sophie Ugolini, du Centre d'immunologie de Marseille-Luminy (INSERM, CNRS, Université Aix-Marseille), a trouvé une piste prometteuse pour stimuler le système immunitaire. En effectuant des mutations au hasard chez la souris, elle a repéré une mutation qui confère aux souris une parfaite résistance à un virus (le cytomégalo virus murin), c'est-à-dire une réponse immunitaire exacerbée.

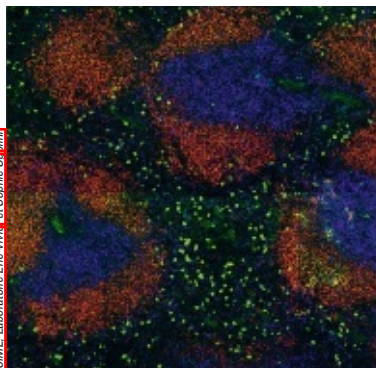
Les biologistes ont noté avec surprise que la mutation inactive un gène qui code une protéine, Nkp46, connue par ailleurs pour... activer la réponse immunitaire, plus précisément les «cellules tueuses naturelles». Ces dernières font partie des sentinelles de l'immunité innée, qui constituent la première ligne de défense de l'organisme contre les microbes et certaines cellules anormales. Nkp46 est un «récepteur activateur» des

cellules tueuses naturelles: situé à leur surface, il les active quand il détecte un motif particulier à la surface d'une autre cellule.

Comment l'inactivation d'une protéine connue pour activer les cellules tueuses naturelles rend-elle ces mêmes cellules hypersensibles aux signaux lancés par les cellules anormales? Sans doute grâce à un autre rôle de Nkp46. Les cellules tueuses nouvellement produites passent par une phase de maturation où elles s'adaptent à leur environnement et apprennent à discerner leurs cibles. Dans ce processus, le récepteur Nkp46 semble freiner l'activation des cellules tueuses tant qu'elles ne sont pas matures. En utilisant un anticorps spécifique qui inactive le récepteur Nkp46, les biologistes espèrent donc développer des applications thérapeutiques pour les patients immunodéficients.

→ M.-N. C.

Science, vol. 335, pp. 344-348, 2012



En temps normal, les cellules tueuses naturelles (en vert) et les lymphocytes T (en bleu) et B (en rouge) – des cellules de l'immunité – sont au repos dans des zones séparées (ici dans la rate d'une souris). À la suite d'une infection, des cellules tueuses se mêlent aux lymphocytes T et B et leur transmettent l'information, tandis que d'autres se dirigent vers la source de l'alerte.

DERNIÈRE minute ...

GLACE PAR LES PLANTES

Une série d'âges de glace est survenue pendant l'Ordovicien, période qui s'est achevée il y a 444 millions d'années. Selon Timothy Lenton, de l'Université d'Exeter, et ses collègues, les premières plantes terrestres en seraient responsables. En sécrétant des acides qui dissolvent les roches, elles auraient favorisé le piégeage géologique du dioxyde de carbone, un gaz à

effet de serre, dont l'abondance aurait alors diminué dans l'atmosphère.

CANCER DU CERVEAU ET HISTONES

Deux équipes, l'une internationale et l'autre américaine, ont montré que le gène d'une histone est muté dans deux des formes les plus mortelles de cancer du cerveau chez l'enfant, le glioblastome et le gliome pontique intrin-

sèque diffus. Protéines autour desquelles s'enroule l'ADN, les histones jouent un rôle crucial dans la régulation de l'expression des gènes. Leur implication dans les tumeurs du cerveau ouvre de nouvelles pistes biomédicales.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur

www.pourlascience.fr



Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ PLUS FROID QU'ULTRAFROID

Aujourd'hui, on fait couramment descendre la température des condensats d'atomes ultrafroids vers le nanokelvin. Waseem Bakr et ses collègues de l'Université Harvard ont élaboré une technique pour aller au-delà (*Nature*, 21 décembre 2011).

Les physiciens préparent des gaz d'atomes ultrafroids en les piégeant au sein de réseaux optiques créés par l'interférence de deux faisceaux laser se propageant en sens inverses (voir *Les atomes ultrafroids*, *Pour la Science*, octobre 2002, http://bit.ly/PLS300_Castin). Ils espèrent utiliser de tels gaz ultrafroids pour modéliser les systèmes à grand nombre d'atomes, tels les solides, dans des conditions bien définies et reproductibles. Cependant, pour certaines des expériences projetées, même une température se mesurant en microkelvins est encore trop élevée, d'où l'intérêt de la nouvelle technique.

Cette dernière repose sur le blocage collectif des atomes dans les sites du réseau optique. Dans ce dernier, les atomes ont des états d'énergie distribués en bande, comme les électrons dans un métal. Les chercheurs ont mis au point une procédure qui permet d'exciter progressivement de plus en plus d'atomes dans les niveaux élevés de la bande, avant qu'ils ne soient évacués. Parce qu'ils se bloquent mutuellement, les atomes qui restent piégés seuls dans les sites du réseau ne peuvent plus bouger. Leur gaz a alors une température très faible. L'énergie excitatrice est fournie par l'un des lasers, dont on ajuste la fréquence.

Cette technique est si prometteuse qu'elle pourrait rendre accessible le domaine des picokelvins (millièmes de milliardièmes de degré).

→ UNE CAPE D'INVISIBILITÉ 3D

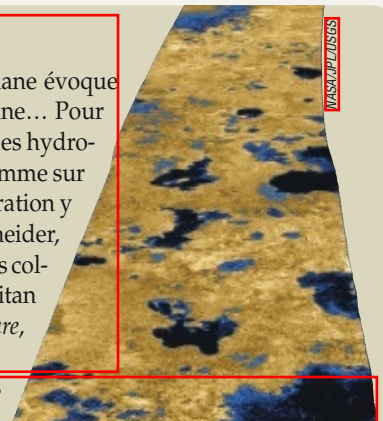
Les capes d'invisibilité sont des matériaux microstructurés (des métamatériaux) de telle façon qu'ils détournent la lumière d'une certaine zone. On n'en avait obtenu jusqu'à présent

→ MÉTHANE TITANESQUE

Sur Mars et sur Titan, la présence de méthane évoque celle de la vie, car la vie produit du méthane... Pour autant, on ignore comment le plus simple des hydrocarbures est produit sur la planète rouge comme sur la lune saturnienne, et pourquoi sa concentration y varie saisonnièrement. En outre, Tapio Schneider, de l'Institut californien de technologie, et des collègues viennent de montrer qu'il existe sur Titan une véritable météorologie du méthane (*Nature*, 20 janvier 2012).

En simulant l'atmosphère de Titan, ces chercheurs ont montré que le méthane y est piégé par le froid, ce qui entraîne qu'il tombe en pluie préférentiellement dans les régions polaires, et surtout au Nord où l'été est plus long. Cela explique les nombreux lacs de méthane visibles aux pôles (davantage au Nord) et les systèmes fluviaux coulant vers les latitudes modérées. Ainsi, le méthane est à Titan ce que l'eau est à la Terre (voir *Le méthane, signe de vie sur Mars et Titan?*, *Pour la Science*, juin 2007, http://bit.ly/PLS356_Atreyia): il creuse des canaux, forme des lacs (voir la photographie), s'évapore et retombe sur le sol en pluies.

D'origine extraterrestre, l'eau sur Terre n'a pas été produite par la vie. Qu'en est-il du méthane sur Titan ? Serait-il produit par des microbes méthanogènes ? C'est possible, mais en petite quantité seulement, et l'on voit mal quels seraient les nutriments de ces micro-organismes. Selon certains chercheurs, de l'eau souterraine entraînerait l'hydratation massive des minéraux de Titan, ce qui produirait de l'hydrogène et du méthane. On prévoit désormais le temps sur Titan, mais il faudra encore du temps pour expliquer vraiment le cycle du méthane qui y règne...



qu'en deux dimensions (voir *L'invisibilité en vue*, *Pour la Science*, août 2009, http://bit.ly/PLS382_Guenneau), mais David Rainwater et ses collègues de l'Université du Texas viennent de faire la démonstration de la première cape d'invisibilité en trois dimensions dans le domaine des micro-ondes (*New Journal of Physics*, 25 janvier 2012).

Ils emploient pour cela un métamatériau plasmonique, c'est-à-dire structuré pour que les oscillations collectives de ses électrons de surface émettent des ondes électromagnétiques interférant de façon destructive avec les ondes électromagnétiques incidentes. Le dispositif consiste en un cylindre formé de bandes métalliques disposées radialement et intégrées dans un matériau dense de permittivité négative. En pratique, cela donne une coquille cylindrique où l'on peut introduire un cylindre de 18 centimètres de long et de

1,25 centimètre de rayon, lequel devient alors invisible à des micro-ondes de trois gigahertz de fréquence (soit une longueur d'onde de dix centimètres) et d'une certaine polarisation, et pour différents angles d'incidence.

Selon D. Rainwater, l'un des avantages des capes plasmoniques est qu'elles sont moins sensibles aux imperfections des conditions d'invisibilité, tout en ayant une bande passante relativement large par comparaison avec les autres principes de cape. Les chercheurs envisagent maintenant de réaliser une cape d'invisibilité en trois dimensions fonctionnant dans le visible. Toutefois, la taille de l'objet qui peut être dissimulé aux ondes change avec l'échelle de la longueur d'onde des ondes incidentes, de sorte que seuls des objets micrométriques pourront être rendus invisibles.

→ François Savatier

POINT DE VUE

Rapprocher les professeurs de la science vivante

Communiquer tôt, à tous les élèves, le goût des sciences passe par les professeurs, auxquels il faut donner les moyens de tisser des liens avec les acteurs de la recherche.

Pierre LÉNA

En janvier 2012, l'Académie des sciences, ainsi que les Écoles normales supérieures de Paris et de Lyon ont mis en place une Fondation de coopération scientifique pour l'éducation à la science. Une fondation supplémentaire cohabitant avec celles qui existent déjà ? Non, sa mission est bien définie et une telle structure, indispensable, n'existait pas encore.

La France est riche d'une jeunesse qui veut apprendre et comprendre, ainsi que de scientifiques créatifs, d'industries innovantes et de professeurs attentifs à leurs élèves. Pourtant, ses résultats dans les évaluations internationales de performances scolaires sont préoccupants, et trop de jeunes quittent le collège en échec, orientés par défaut vers des filières qu'ils n'ont pas choisies. Trop d'images négatives de la science et des techniques subsistent chez eux et notamment chez les filles, trop de talents demeurent en friche, car la scolarité de 5 à 16 ans ne permet pas l'épanouissement de la diversité des intelligences. La saveur de la science est bien peu transmise à des enfants et des adolescents dont la curiosité est vive et la créativité prête à s'exprimer. Historiquement, les voies scientifiques ont été source d'ascension sociale. Ce n'est plus le cas aujourd'hui, et un enseignement rénové de science permettrait d'attirer les élèves issus des zones sensibles vers les filières dites d'excellence.

Veiller à la qualité de l'enseignement scientifique est une mission essentielle de l'Académie des sciences. Dès 1996, elle a soutenu le lancement, puis le développement avec

Georges Charpak, lauréat du prix Nobel de physique en 1992, de l'initiative *La main à la pâte* pour réintégrer l'enseignement de la science à l'école primaire. Elle s'est appuyée sur les nombreux professeurs qui lui ont fait confiance. Après 2006, elle a expérimenté avec succès un enseignement intégré en début du collège, là où se fait ou se défait le goût pour la science et la technique. Dans ce cadre, les professeurs de physique et chimie, sciences de la vie et de la Terre, et technologie travaillent ensemble.

Néanmoins, ces actions conduites depuis plus d'une décennie pour améliorer l'enseignement scientifique se révèlent insuffi-

LE MONDE SCIENTIFIQUE
doit accompagner le corps enseignant pour faire face aux mutations de notre époque.

santes. Il faut changer d'échelle et agir de façon plus volontariste et structurée. Lors de ces années décisives pour l'élève, l'égalité des chances passe notamment par un enseignement scientifique et technique de qualité, contribuant à compenser les privilèges économiques ou culturels de la naissance, à révéler les talents et à mieux préparer les orientations professionnelles ultérieures.

Mais la motivation des élèves, la qualité de ce qu'ils apprennent, la naissance d'une vocation passent d'abord par le développement professionnel (la formation continue) des professeurs qui enseignent sciences, technologies et mathématiques – 370 000 à l'école primaire et plus de 50 000 au collège en France. La communauté des scientifiques et des ingénieurs doit aider ces maîtres à

renouer leur lien avec une science vivante, pour mieux en communiquer le goût à leurs élèves, mieux maîtriser les compétences nécessaires à un enseignement inductif, fondé sur l'investigation.

C'est ce qu'ont fait avec succès les Britanniques avec la mise en place, depuis 2006, de leurs neuf *National Science Learning Centers*. Les milliers de professeurs accueillis – de sciences et désormais de mathématiques –, du primaire et du collège, témoignent d'une profonde évolution de leur pratique pédagogique, d'un travail collectif dans leur école, et d'une motivation accrue de leurs élèves. À l'entrée en seconde on observe depuis 2007 une remontée notable des choix pour la chimie, la physique et la biologie, inversant la décroissance antérieure. En chimie, par exemple, l'augmentation a atteint 25 pour cent entre 2004 et 2009.

S'inspirant de ce succès, l'Académie a proposé au programme d'Investissements d'avenir un dispositif qui démontrerait, en cinq années, qu'il n'y a pas de fatalité en ce domaine. Sélectionné et financé, ce projet conduit à concevoir, au service des professeurs d'école et collège, des Maisons de science prototypes, pour l'instant dans quatre universités – Strasbourg, Toulouse, Clermont-Ferrand, et Nancy –, en lien étroit avec les rectorats concernés, les associations de professeurs, les organismes de recherche et l'industrie. Maisons de science, puisqu'il s'agit d'y rencontrer, sous de multiples formes – dont nombre sont à inventer –, la science vivante, quasi absente de ce qui reste de la formation continue institutionnelle. L'objectif est ambitieux. Il vise

à ce qu'au terme de cinq années, certaines de ces maisons aient pu travailler avec 10 à 20 pour cent des professeurs d'école et de collège de leur région, les aidant ainsi à faire évoluer leur pédagogie, à mieux jouer leur rôle de passeur de savoir et de pratique entre deux mondes : celui du laboratoire ou du bureau d'études, et celui de la classe.

Les grands thèmes scientifiques et techniques du socle commun de connaissances et de compétences, promulgué en 2006, sont ceux dont une première fréquentation est essentielle pour tous les élèves avant la fin du collège, mais chacun de ces thèmes est aussi en lien avec la recherche et l'industrie. Scientifiques et ingénieurs peuvent partager avec les professeurs découvertes et défis. Dans l'esprit qui anime déjà nombre d'organismes publics de recherche, l'Agence nationale de la recherche a introduit, dans ses

critères d'analyse des projets soumis, une évaluation des ressources qu'ils produiront pour les professeurs et le public. Les Maisons de science contribueront à ce partage de savoir d'une façon structurée et inventive, en offrant au corps enseignant un lieu, permanent et bien équipé, de dialogue et de formation. Les universités hôtes des Maisons seront aidées depuis Paris par un Centre national, qui hérite de l'équipe constituée par l'Académie des sciences au fil des 15 dernières années pour accompagner *La main à la pâte*.

La Fondation repose sur une idée forte : le monde scientifique doit accompagner le corps enseignant pour faire face aux profondes mutations de notre époque. Cette idée vient d'atteindre les États-Unis, où, en 2010, un rapport de la *National Academy of Sciences* soulignait que ce pays se classait 25^e sur 27 pays industrialisés en termes d'étudiants

diplômés en science ou ingénierie ! La Maison-Blanche a récemment réagi en demandant aux scientifiques d'accompagner les professeurs, en soutien à son programme *Change the Equation*. En France, grâce aux Investissements d'avenir et aux concours attendus des rectorats, qui devront décider de soutenir l'enjeu de l'éducation à la science, quatre Maisons de science, prototypes au service des professeurs, ouvriront donc dès la rentrée 2012, portées par la nouvelle Fondation, son Conseil scientifique et des membres de l'Académie des sciences. ■

Pierre LÉNA est le président de la Fondation La main à la pâte.

www.fondation-lamap.org
www.academie-sciences.fr/enseignement



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Quand le plastique se fait tout petit

Plus de 240 millions de tonnes de plastique sont produites chaque année. En fin de vie, une bonne partie de ces matériaux se retrouvent sous la forme de particules microscopiques, qui finissent par s'accumuler dans les mers.

Maurice MASHAAL

Les plastiques sont des matériaux fantastiques, tout le monde en convient. Mais ils sont envahissants quand ils deviennent des déchets. En témoignent les sacs et autres objets qui défigurent forêts, campagnes et terrains vagues, les récipients, capuchons et débris divers qui jonchent les bords des routes et chemins, les sacs ingérés par les tortues de mer, etc. À cette pollution visible s'en ajoute une autre, plus insidieuse et, à certains égards, plus préoccupante : la contamination des mers par les microplastiques, c'est-à-dire des particules ou fragments de plastique de taille inférieure à quelques millimètres.

Que sait-on de la pollution marine par les microplastiques ? Un bilan vient d'être publié par Matthew Cole, du Laboratoire marin de Plymouth, en Angleterre, et trois collaboratrices. Il en ressort que si les études sur le sujet se multiplient, il reste encore beaucoup à faire pour cerner quantitativement cette pollution microscopique et son impact environnemental ou sanitaire.

Pour commencer, on distingue les microplastiques primaires, qui sont des matériaux fabriqués d'emblée avec une très petite taille, et les microplastiques secondaires, débris issus de la fragmentation ou de l'usure d'objets macroscopiques. Les microplas-

tiques primaires sont essentiellement des produits utilisés pour les démaquillants et d'autres produits cosmétiques tels que les exfoliants, ou encore pour le nettoyage de surfaces peintes ou rouillées par projection de poudres abrasives. On les utilise aussi de plus en plus en médecine, en tant que vecteurs de médicaments.

Quant aux microplastiques secondaires, les processus qui les engendrent sont multiples : chocs et usures mécaniques, attaques chimiques, fragilisation de la matrice polymère sous l'action des ultraviolets, etc. Le processus de fragmentation se poursuivrait jusqu'à former des particules de



→ pouirlascience.naturejobs.com

Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec **naturejobs**



- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi** dans le secteur des sciences.
- En un clic la **sélection des postes à pourvoir** en France et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones**.
Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

taille nanométrique, susceptibles de passer facilement dans la chaîne alimentaire. Mais cela reste à confirmer.

Notons que les plastiques dits biodégradables sont également une source de microplastiques. En effet, il s'agit en général de composites mêlant polymères de synthèse et amidons, seuls ces derniers étant vraiment biodégradables.

Où vont les microplastiques ? Les débris s'accumulent dans le milieu marin, les apports étant soit directs (rejets par les activités humaines sur le littoral et en mer), soit, à 80 pour cent, indirects (lessivage de sols pollués, déchets charriés par les rivières, eaux usées, etc.). Les études disponibles indiquent que l'on retrouve des microplastiques dans toutes les mers, sur toute la hauteur de la colonne d'eau et presque partout.

Par exemple, Mark Browne, de l'*University College* de Dublin, et ses collègues ont montré que les microplastiques contaminent les côtes de 18 sites échantillonnés sur les six continents. Les milieux côtiers et les estuaires sont de fait les plus concernés, même s'il existe en plein milieu des océans des gyres, énormes tourbillons formés par les courants, qui concentrent de grandes quantités de débris divers, dont les microplastiques. Ainsi, dans le gyre du Pacifique Nord, des chercheurs ont dénombré en 2001 plus de 330 000 fragments de plastique par kilomètre carré...

Les quantités de microplastiques présentes dans le milieu marin sont des informations cruciales pour évaluer l'ampleur de la pollution et ses impacts. Mais les données en la matière ne sont encore que parcellaires. Premier obstacle : les océans sont vastes et les côtes sont longues... D'autres problèmes – surmontables – sont de nature méthodologique et rendent difficile la comparaison entre les diverses études. La définition même des microplastiques est un peu vague, certains chercheurs s'arrêtant à une taille maximale de trois millimètres, d'autres à un millimètre, etc. Cela se traduit dans les techniques d'échantillonnage et, par exemple, les résultats obtenus avec des filets à mailles très fines ne sont pas les mêmes que ceux obtenus avec des filets plus grossiers.

L'étude récente de M. Browne et ses collègues a trouvé, selon les endroits sondés, entre 8 et 120 fibres (polyéthylène, polyester, polypropylène, etc.) par litre de sédiment. Elle a aussi constaté, comme attendu, que les abondances les plus élevées se rencontrent là où la population est dense et où se déversent les eaux usées, traitées ou non.

UNE GRANDE PARTIE DES FIBRES de plastique retrouvées dans le milieu marin proviendraient... des lave-linge !

L'équipe de M. Browne a aussi découvert qu'une grande partie des fibres de plastique retrouvées dans le milieu marin proviendraient... des lessives de vêtements, dont beaucoup contiennent des fibres synthétiques ! Des tests avec des lave-linge le corroborent : le lavage d'un seul vêtement peut rejeter plus de 1 900 fibres. Avec plus de 100 fibres par litre d'eau rejeté, le lavage du linge se révèle ainsi une source importante de microplastiques. Raison de plus pour se vêtir avec des tissus naturels, même si un jour se met en place un filtrage plus efficace dans les lave-linge et le traitement des eaux...

Quant à l'impact environnemental et sanitaire des microplastiques, il est encore mal connu. En tout cas, le rôle de perturbateurs endocriniens de certains composants, tels le bisphénol A, ne rassure pas. Tamara Galloway, de l'Université d'Exeter, qui a participé au bilan et aux études cités ici, explique que « l'ingestion de microplastiques par les animaux marins pourrait entraîner une accumulation de contaminants dans la chaîne alimentaire et, en fin de compte, nuire à la santé humaine ». Bref, insiste-t-elle, « Il faut faire plus d'efforts pour mesurer ce qu'il y a et comprendre comment les débris marins sont transportés et s'accumulent. »

Maurice MASHAAL est rédacteur en chef de Pour la Science.

M. Cole et al., Microplastics as contaminants in the marine environment : a review, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62(12), pp. 2588-2597, décembre 2011.

M. A. Browne et al., Accumulation of microplastic on shorelines worldwide : sources and sinks, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 9175-9179, 2011.

Une suite d'applications scientifiques à la pointe de la technologie !

- Aéronautique
- Agroalimentaire
- Biochimie
- Biologie
- Chimie
- Finance
- Génétique
- Matériaux
- Médecine
- Microbiologie
- Pharmacologie
- Physique
- Psychologie
- Toxicologie
- Zoologie...

Analyse de pics

Ajustement de surfaces

Ajustement de courbes

TableCurve 3D

TableCurve 2D
Automated curve fitting
and equation discovery

PeakFit

AutoSignal

SYSTAT 13

SigmaScan

Mesure et analyse d'images

Analyse du signal

Analyse et visualisation
de données scientifiques

Analyse
statistique

Plus d'informations sur :

www.ritime.com/go/systat

RITME Informatique - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritime.com • www.ritime.com



Disponible pour Windows.

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livrés par CD-Rom.

© Copyright 2011 RITME. Les produits Systat sont des marques déposées de Systat Software.

Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
INFORMATIQUE

Distributeur officiel en France

VRAI OU FAUX

Le Soleil va-t-il vraiment s'éteindre ?

Oui. Dans cinq milliards d'années, il se transformera en géante rouge, puis en naine blanche, qui se refroidira lentement.

Roland LEHOUCQ

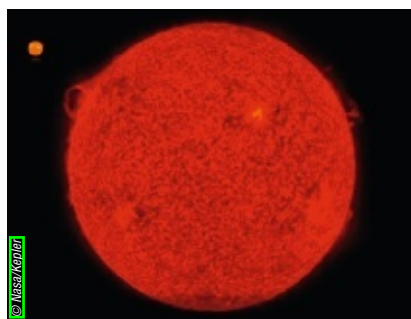
Le Soleil a commencé à briller il y a 4,56 milliards d'années. Ses réserves d'énergie sont-elles inépuisables ? Afin de le déterminer, examinons d'abord comment il brille.

Une étoile est une sphère de gaz chaud, dont la cohésion résulte de l'attraction gravitationnelle entre ses particules. Elle ne s'effondre pas sur elle-même car, partout, la pression s'oppose à la gravitation. La pression augmente avec la profondeur, entraînant un échauffement du gaz stellaire : de quelques milliers de degrés en surface, la température atteint quelques dizaines à quelques centaines de millions de degrés dans les régions centrales, selon la masse de l'étoile. Ce déséquilibre de température provoque un transfert d'énergie du cœur de l'astre vers sa surface. Le flux d'énergie s'échappe ensuite sous forme de rayonnement : l'étoile brille.

Ainsi, l'étoile est condamnée à perdre de l'énergie par sa surface. Comment l'hémorragie est-elle compensée ? Au début du XX^e siècle, les physiciens comprirent que seules des réactions nucléaires sont capables de faire briller durablement les étoiles. Ils estimèrent qu'elles produisent assez d'énergie pour alimenter le Soleil pendant plusieurs milliards d'années, durée comparable à l'âge de la Terre déterminé par les géologues. Le physicien allemand Hans Bethe décrit les réactions en jeu : quatre noyaux d'hydrogène (H^+) fusionnent en un noyau d'hélium (He^{2+} , composé de deux protons et deux neutrons), ce qui implique que deux protons se transforment en neutrons. Ces réactions se déroulent au cœur du Soleil, seule région où l'agitation thermique, aidée par un effet dit tunnel, est suffisante pour que les noyaux se

rapprochent malgré la répulsion électrique qu'ils exercent les uns sur les autres.

Une réaction de fusion produit de l'énergie, car la somme des masses des noyaux pères est supérieure à la masse du noyau fils : au centre du Soleil, 619 millions de tonnes d'hydrogène réagissent ainsi chaque seconde pour former 614,7 millions de tonnes d'hélium. La différence (environ 0,7 pour cent de la masse initiale) est transformée en énergie, et cette énergie compense exactement celle qui s'échappe par la surface.



Le Soleil dans son état actuel (en haut à gauche), comparé à la plus grande géante rouge observée par le satellite Kepler (au centre).

Inéluctablement, l'hydrogène central s'épuise. Dans environ cinq milliards d'années, il devrait s'être presque totalement transformé en hélium, entraînant un ralentissement des réactions de fusion. Dès lors, le cœur du Soleil se contractera et l'échauffement résultant déclenchera la fusion des noyaux d'hélium issus du cycle précédent ; ainsi, des éléments plus lourds, tel le carbone, se formeront. La puissance dégagée, supérieure à celle provenant de la fusion de l'hydrogène, dilatera l'enveloppe externe de l'étoile, dont le rayon sera multiplié par plusieurs

dizaines. En conséquence, la surface se refroidira et changera de couleur. Le Soleil deviendra alors une géante rouge, qui engloutira Mercure et Vénus ; la Terre ne devrait pas être atteinte, mais l'énorme flux d'énergie reçu sera difficile à supporter pour la vie à sa surface. Notre étoile restera dans cet état jusqu'au terme de la combustion de l'hélium, qui durera environ un milliard d'années.

L'hélium épuisé, la matière centrale se contractera à nouveau. Cependant, elle ne pourra pas amorcer un nouveau cycle de fusion, en raison de la trop faible masse du Soleil – plus les noyaux qui fusionnent sont gros, plus l'énergie nécessaire pour déclencher la réaction est grande.

La contraction provoquera tout de même un échauffement. Une partie de l'enveloppe externe du Soleil sera alors expulsée dans l'espace, donnant naissance à une nébuleuse planétaire. Le reste de notre étoile deviendra une naine blanche, à peine plus grosse que la Terre, mais pesant près de la moitié de la masse actuelle du Soleil. Très chaude, l'étoile naine émettra toujours un rayonnement thermique ; toutefois, sa luminosité ne vaudra plus que le millième de celle émise aujourd'hui. Elle ne s'éteindra pas d'un coup mais, dépourvue de source interne d'énergie, elle se refroidira lentement et brillera de moins en moins intensément. En outre, ses atomes s'ordonneront pour former un gigantesque cristal. Au bout de quelques centaines de milliards d'années, le flux lumineux dans le domaine visible sera devenu très faible : le Soleil cessera alors définitivement de briller. ■

R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

DES GIGA OCTETS DE CULTURE SCIENTIFIQUE À VOTRE DISPOSITION !



ABONNEZ-VOUS

14 € / trimestre
seulement !

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

POUR LA
SCIENCE

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** au prix de **14 € par trimestre**. Je reçois 12 numéros par an et bénéficie aussi des versions numériques sur www.pourlascience.fr

☐ J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____
E-mail : _____ @ _____

☐ Je choisis mon mode de règlement

* Pour recevoir la newsletter (à remplir en majuscule).

☐ Je règle en douceur 14 €/trimestre. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement un RIB.

** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

Autorisation de prélèvement automatique (France métropolitaine uniquement). J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvement trimestriels présentés par **Pour la Science**. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à **Pour la Science** pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom : _____
N° : _____ Rue : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement : _____
N° : _____ Rue : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Compte à débiter

Établissement : _____ Code guichet : _____ N° de compte : _____ Clé RIB : _____

Date et signature (obligatoire)

Organisme créancier
Pour la Science
8 rue Férou - 75006 Paris
N° national d'émetteur : 426900

☐ Je règle mon abonnement en une seule fois 56 € (Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 12 € - autres pays : 25 €)

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

☐ par carte bancaire

N° : _____
Expire fin : _____ Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____

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

PLS413 - Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2012

L'Égypte ancienne à l'aune du radiocarbone

Eva Maria Wild et Walter Kutschera

Il y a 60 ans, des objets égyptiens ont servi à mettre au point la méthode de datation au radiocarbone. Aujourd'hui, épaulée par la spectrométrie de masse par accélérateur, la radiodotation contribue à résoudre les énigmes de la chronologie égyptienne.



*Soldats! Songez que du haut de ces pyramides,
40 siècles vous contemplent.*
Bonaparte, bataille des Pyramides, 1798

Napoléon avait tort avec ses « 40 siècles », mais il ne se trompait que de 400 ans... Du moins en ce qui concerne la pyramide de Khéops, puisque la seule des sept merveilles du monde encore visible a été construite au XXVI^e siècle avant notre ère, il y a plus de 4500 ans. Ainsi, l'estimation de Napoléon était plutôt bonne, si l'on tient compte du fait que l'étude scientifique de l'Égypte ancienne ne commença qu'avec l'arrivée sur les rives du Nil des bataillons de... savants du général Bonaparte.

Depuis, beaucoup d'eau a coulé dans le Nil et une multitude de scientifiques ont travaillé à décrypter la civilisation de l'Égypte ancienne. L'un de leurs principaux efforts consiste à établir une chronologie absolue des règnes pharaoniques. Or, après plus de deux siècles de travail, nombre d'incertitudes demeurent. Les discussions entre égyptologues ont abouti à l'emploi de deux chronologies : la chronologie « haute » et la chronologie « basse ». Leurs divergences sont d'autant plus grandes qu'elles concernent des époques lointaines.

Rappelons que l'histoire égyptienne se divise en trois grandes ères historiques – l'Ancien Empire (qui a débuté vers 2700 avant notre ère), le Moyen Empire (depuis 2050 environ) et le Nouvel Empire (depuis 1550 avant notre ère) –, séparées par des « périodes intermédiaires ». Pour le Nouvel Empire, les divergences entre les chronologies haute et basse sont de l'ordre de dix ans ; pour l'Ancien Empire, elles dépassent le siècle !

C'est pourquoi, sous la direction de Christopher Bronk Ramsey, de l'Université d'Oxford, une équipe de chercheurs israéliens, français, britanniques et autrichiens (nous-mêmes) a travaillé trois ans durant pour réduire ces désaccords en utilisant la datation par le carbone 14. Après avoir présenté cette méthode, nous expliquerons comment nous l'avons appliquée pour clarifier la chronologie égyptienne.

La datation est un problème essentiel pour toutes les sciences du passé. Notamment en préhistoire, où les sources

1. LE TEMPLE DE LA REINE HATCHEPSOUT
a livré les pépins des raisins consommés par ses constructeurs. Ils ont été datés par le carbone 14 pour préciser la durée de son règne.

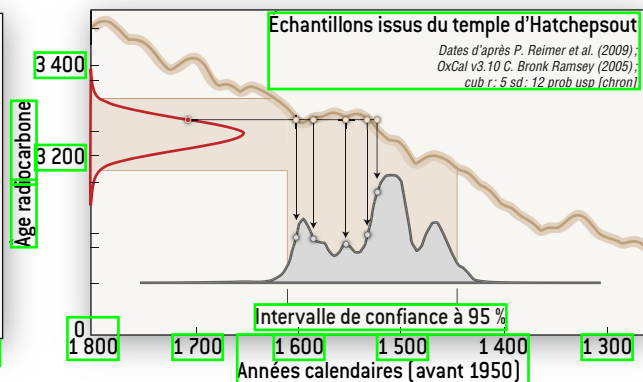
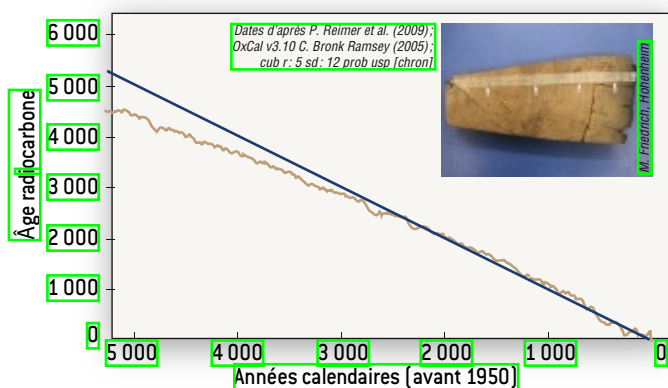
L'ESSENTIEL

✓ Produit en continu dans la stratosphère, le carbone 14 est un isotope radioactif à la base d'une méthode de datation très utile en archéologie.

✓ La méthode de datation au carbone 14 est soumise à divers biais dont il faut tenir compte avec soin. Les corrections à appliquer sont résumées par une courbe de calibration, dont la dernière a été élaborée en 2009.

✓ La datation au carbone 14 de 211 échantillons issus des musées vient de préciser la chronologie de l'Égypte ancienne.

© Shutterstock / Lucraft / Remis



2. UNE PROPORTION CONSTANTE DE CARBONE 14 dans l'atmosphère implique un âge radiocarbone variant linéairement en fonction du temps réel (*droite bleue*). Cependant, les variations du champ magnétique terrestre modifient la production de carbone 14 dans l'atmosphère. Les physiiciens se sont appuyés sur la datation par les cernes de croissance des arbres, qui permet par exemple de dater un objet en bois (*cartouche*), et d'autres méthodes pour élaborer la courbe de calibration « IntCal09 » (*en brun*), qui permet de corriger les âges calculés par la radiodation.

3. LES PETITES VARIATIONS DE LA COURBE DE CALIBRATION compliquent la datation. Les âges radiocarbone possibles d'un échantillon suivent une loi de probabilité décrite par une gaussienne (*en rouge*). Mais en tenant compte de la courbe de calibration et de ses irrégularités (*en marron*), on trouve que la loi de probabilité (*en gris*) que suivent les dates corrigées est plus étalée et comporte plusieurs sommets. L'intervalle de confiance qui contient l'âge de l'échantillon avec une probabilité de 95,4 pour cent couvre ainsi environ 165 ans.

textuelles sont absentes, on doit restituer les cultures à partir d'artefacts, par exemple lithiques. Après le Paléolithique, les principaux marqueurs temporels préhistoriques sont les tessons de poterie, puisque le style des céramiques s'est renouvelé à chaque remplacement d'une culture par une autre.

Ces datations typologiques ne sont toutefois que relatives, c'est-à-dire qu'elles ne se réfèrent pas à un point déterminé sur l'échelle temporelle. La toute première datation absolue, qui se réfère explicitement à une date de notre calendrier et non à un événement évoqué dans un texte, a été rendue possible par la méthode du radiocarbone mise au point vers 1945 par Willard Libby (1908-1980).

Ce physico-chimiste américain a découvert que les protons issus du rayonnement cosmique produisent des neutrons lorsqu'ils rencontrent les molécules de l'air stratosphérique. Ces neutrons entrent ensuite en collision avec les atomes d'azote de l'air et forment notamment des atomes de carbone 14, un isotope radioactif noté ^{14}C et souvent nommé radiocarbone.

Sur le plan chimique, le radiocarbone se comporte comme les isotopes bien plus fréquents que sont le carbone 12 (l'isotope dominant, ^{12}C) et le carbone 13 (^{13}C). Les réactions avec l'oxygène produisent ainsi des molécules de dioxyde de carbone intégrant cet isotope, $^{14}\text{CO}_2$. Le dioxyde de carbone étant assimilé par photosynthèse, le radiocarbone se retrouve dans la chaîne alimentaire, est intégré aux organismes vivants et retourne dans l'atmosphère *via* la respiration et la décomposition de

la matière organique. Outre ce cycle lié à la vie, un échange de radiocarbone se produit entre l'air et la surface océanique.

Libby supposa d'abord que le transport du carbone 14 dans la biosphère, sa production dans la haute atmosphère et sa désintégration radioactive spontanée concourent à ce que la proportion par rapport au carbone 12 du carbone 14 dans l'air et la biomasse se soit établie au cours du temps à une valeur stable.

Le carbone 14, une horloge naturelle

À la mort d'un organisme vivant, tous ses échanges de carbone avec l'extérieur prennent fin. À cet instant, une horloge naturelle – l'horloge au carbone 14 – se déclenche, car la proportion de carbone 14 dans l'organisme se met à décroître exponentiellement avec le temps selon un rythme connu, par radioactivité. Dans l'hypothèse où la concentration atmosphérique de carbone 14 n'a pas varié au cours du temps, il suffit alors de comparer la proportion de carbone 14 d'un échantillon avec la proportion atmosphérique pour déduire l'âge de l'échantillon, ou plus exactement le temps écoulé depuis que l'organisme correspondant est mort. Tel est le principe de la datation au radiocarbone.

Libby et son équipe ont réalisé leurs premières datations sur des échantillons égyptiens d'âges connus et certains. Cherchant à prouver que l'intensité du rayonnement cosmique était restée égale dans le temps, ils ont procédé en supposant une

concentration atmosphérique constante de carbone 14; ils voulaient par ailleurs établir le principe de l'horloge au carbone 14, c'est-à-dire qu'il existait bien de la matière organique où seule la désintégration par radioactivité, et non les conditions du stockage ou d'autres causes, fait varier la proportion de radiocarbone.

À cet effet, ils employèrent notamment un échantillon de bois provenant du bateau funéraire de Sésostri III, que les archéologues faisaient remonter à 1843 avant notre ère, à 50 ans près. Or la nouvelle méthode donna un âge de 3700 ± 400 ans, soit 1750 ans avant notre ère à 400 ans près. Ce résultat passait pour précis, mais nous savons aujourd'hui que les 800 ans d'incertitude résultent de sources d'erreurs alors inconnues.

En réalité, la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère n'est pas constante dans le temps. C'est pourquoi les mesures réalisées après les premiers travaux de Libby sur des échantillons datant de l'Ancien Empire divergeaient de plusieurs centaines d'années des datations historiques. Vers 2500 avant notre ère, le champ magnétique terrestre s'est en effet affaibli, ce qui a laissé davantage de rayons cosmiques pénétrer dans l'atmosphère. La concentration atmosphérique en carbone 14 a augmenté alors, d'où un biais dans l'âge mesuré en laboratoire par la méthode de Libby.

Ce biais faillit discréditer auprès des historiens la méthode de datation inventée par Libby. De son côté, ce dernier mettait en cause les datations historiques... En outre, au début des années 1960, des écarts sont

apparus entre les datations par le carbone 14 et les âges dendrochronologiques (fondés sur les cernes de croissance des arbres, voir l'encadré ci-dessous). L'idée que la proportion carbone 14/carbone 12 dans l'atmosphère était restée inchangée au cours du temps introduisait manifestement un biais systématique. En réalité, différents facteurs font varier la proportion de carbone 14. C'est pourquoi, depuis les années 1980, on corrige les résultats de la datation au radiocarbone par la dendrochronologie. Le principe est de déterminer la proportion de carbone 14 dans le carbone issu du matériau étudié, puis de trouver un échantillon de bois datable par dendrochronologie et ayant la même teneur en carbone 14.

Dans la pratique, on ne compare pas les contenus en carbone 14 eux-mêmes, mais on détermine un « âge radiocarbone non calibré » de l'échantillon à partir de la mesure de sa proportion de radiocarbone. Pour ce faire, on emploie par convention la valeur de la demi-vie du carbone 14 calculée par

Libby : 5568 ans (la demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs présents initialement se sont désintégrés). L'âge non calibré trouvé est ensuite transformé en une année calendaire grâce à une courbe intégrant toutes les corrections de la variation temporelle de la proportion de radiocarbone obtenues par dendrochronologie (voir la figure 2). L'avantage de cette façon de calibrer est que la valeur de la demi-vie du carbone 14, imprécise connue (elle est de 5700 ± 30 ans), n'y joue aucun rôle.

De nombreux biais

Nommée IntCal09, la courbe d'étalonnage utilisée depuis 2009 permet de calibrer des âges jusqu'à environ 50 000 ans. Elle intègre les données issues de la dendrochronologie, qui couvrent les 11 000 dernières années, puis celles provenant des registres à plus longue portée que représentent les concentrations en carbone 14 des coraux

et des carbonates contenus dans les sédiments marins.

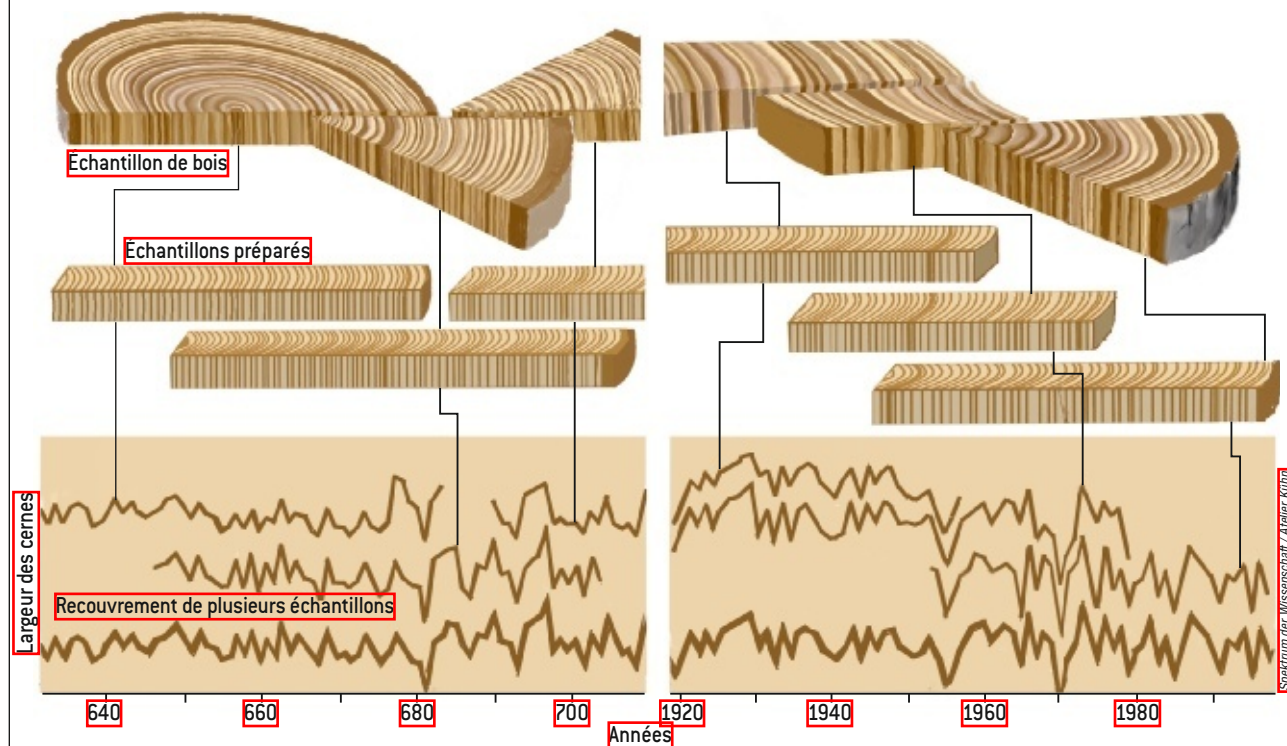
Le magnétisme terrestre n'est en effet pas le seul facteur qui agit sur la concentration atmosphérique de radiocarbone. Parce qu'ils sont de masses différentes, les trois isotopes du carbone ne sont pas ingérés de la même façon par tous les organismes vivants. Plus léger, le carbone 12 est davantage intégré aux plantes par la photosynthèse. C'est pourquoi les valeurs du rapport isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ varient dans la biosphère, d'où des différences d'âges de quelques centaines d'années entre échantillons de même âge réel...

Par chance, ce problème a une solution fiable. En effet, le carbone 13 est à peu près aussi désavantagé que le carbone 14 par la photosynthèse, de sorte que le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, qu'aucune désintégration ne modifie (le carbone 13 est stable), est resté égal au cours des siècles. Au sein des échantillons issus de la biosphère, la comparaison des rapports

LA DENDROCHRONOLOGIE : L'HORLOGE DES CERNES DE CROISSANCE

Sous les latitudes tempérées, les arbres ne croissent que pendant la période végétative, qui dure du printemps à l'automne. De là viennent les cernes de croissance des arbres. Ils marquent chaque année, et rendent la détermination de l'âge des arbres possible par comptage des cernes depuis le plus ancien, c'est-à-dire le plus intérieur. L'épaisseur des cernes dépend des conditions locales. Ainsi, la plante crée plus de masse pendant les années humides et moins durant les années sèches, de sorte

qu'un motif particulier caractérise chaque série d'années. Ce sont ces motifs qu'exploitent les dendrochronologistes pour dater des événements que l'on peut associer à un échantillon de bois. En Europe, la dendrochronologie par les chênes et les hêtres remonte de 12 500 ans dans le temps, soit jusqu'à la fin de la dernière glaciation. Comme la dendrochronologie fixe la date d'un événement pouvant être associé à un échantillon de bois à une année près, c'est la plus précise des méthodes de datation.



isotopiques $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ élimine ainsi le biais photosynthétique.

À ce point, on pourrait croire avoir pris en compte tous les biais possibles. Il n'en est rien. Par exemple, le carbone 14 se révèle sous-représenté dans la couche superficielle des océans, par rapport à l'air. Ce phénomène est dû à la lenteur avec laquelle les eaux océaniques se mélangent à mesure que des courants ascendants amènent l'« eau ancienne » du fond en surface, ce qui a pour effet d'y diluer le carbone 14. L'âge radiocarbone des organismes se nourrissant de la mer dépasse pour cette raison de quelque 400 ans leur âge réel, ce qui est pris en compte dans la partie de la courbe d'étalonnage établie à partir d'échantillons marins.

Cet effet aquatique s'étend aux organismes terrestres. Ainsi, on constate qu'après calibration l'âge des échantillons provenant de l'hémisphère Sud, où les mers occupent une surface bien plus importante qu'au Nord, semble excéder l'âge réel de quelque 40 ans... Au Sud,

les échanges entre l'atmosphère et la surface océanique introduisent davantage de carbone 14 dans l'air.

Autre aspect : la courbe de calibration est entachée de petites fluctuations (voir les figures 2 et 3). Bien qu'elles ne soient pas encore comprises dans le détail, on pense que ces petites variations sont dues pour l'essentiel aux changements de l'activité solaire. Les méthodes de mesure d'aujourd'hui permettent en principe d'obtenir un âge précis à des dizaines d'années près, mais ces variations dégradent cette précision à quelques centaines d'années.

Statistiques de Bayes à la rescousse

Par ailleurs, les incertitudes statistiques limitent la précision des mesures physiques en répartissant les résultats sur un certain intervalle autour d'une valeur moyenne. En général, cette répartition suit une courbe en cloche que l'on nomme une gaussienne. Une datation de $X \pm 30$ ans signifie donc

que le sommet de cette courbe est en X tandis que ses points d'inflexion sont distants de 30 ans de chaque côté. Nommé déviation standard, l'intervalle allant d'un point d'inflexion à l'autre (± 30 ans) couvre 68,2 pour cent des résultats de mesure ; il en couvre 95,4 pour cent si on le double (± 60 ans). Ces pourcentages donnent en fait les probabilités que l'âge vrai se trouve à l'intérieur d'un intervalle dit « de confiance », dont la longueur est exprimée en multiples de la déviation standard. Si la relation entre les datations non calibrées et les âges vrais était linéaire, on obtiendrait après calibration une autre courbe de Gauss, mais les petites fluctuations (présomées) solaires compliquent la situation.

Illustrons cela par un exemple tiré de notre pratique. Nous avons daté certains pépins de raisins consommés lors de la construction du temple d'Hatshepsout (voir la figure 1). D'après les chronologies historiques, ce temple aurait été érigé vers 1470 avant notre ère. L'âge radiocarbone non calibré des pépins s'est révélé

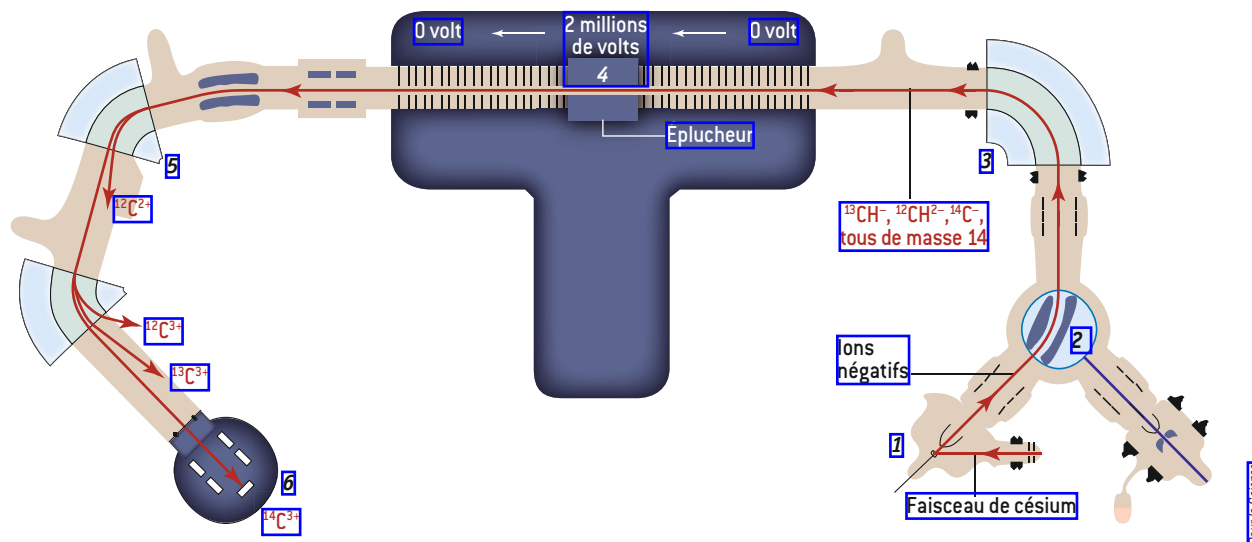
LE PRINCIPE DE LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE PAR ACCÉLÉRATEUR

L'âge radiocarbone se détermine à partir de la valeur du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, que la valeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ contribue à corriger. On utilise pour mesurer ces rapports isotopiques la spectrométrie de masse. Toutefois, les spectromètres de masse usuels ne conviennent pas, car les ions de carbone 14 y sont noyés dans un flux d'ions d'azote 14, provenant de l'air, et d'autres ions de carbone moléculaire tels $^{13}\text{CH}^-$, $^{12}\text{CH}_2^-$,...

C'est pourquoi on emploie plutôt un spectromètre de masse par accélérateur. Après sa transformation chimique en graphite (1), l'échantillon y est pulvérisé par un faisceau de césium, qui en éjecte des ions négatifs. L'hydrogène étant partout, certains ions sont du carbone moléculaire, d'ailleurs susceptible de se former aussi plus loin. Le faisceau est ensuite pré-accélééré (2), puis défléchi par un premier aimant (3), qui permet de sélectionner tous les ions de masse 14 avant leur introduc-

tion dans un accélérateur électrostatique, où la tension électrique croît jusqu'à plusieurs millions de volts au centre, puis décroît jusqu'à zéro. La collision au centre de l'accélérateur des ions négatifs avec un dispositif nommé éplucheur contenant de l'argon gazeux sous faible pression (4) casse les ions $^{13}\text{CH}^-$, $^{12}\text{CH}_2^-$ et arrache aux atomes de carbone plusieurs électrons, de sorte qu'ils deviennent positifs (C^{2+} , C^{3+} , C^{4+} ,...). Tous les ions positifs ainsi produits sont alors accélérés dans la seconde partie du tandem par la tension électrique décroissante, puis triés par un deuxième aimant et par un aimant d'analyse final (5), qui permet de mesurer les flux de $^{12}\text{C}^{3+}$ et $^{13}\text{C}^{3+}$ et de compter le nombre de $^{14}\text{C}^{3+}$ par unité de temps (6).

Grâce aux spectromètres de masse par accélérateur, on parvient à mesurer des rapports isotopiques de l'ordre de 10^{-15} (10^{-9} pour les spectromètres usuels) à partir d'échantillons archéologiques minuscules.



être de 3249 ± 32 ans BP. Rappelons que selon la convention usuelle en datation, BP (*Before Present*, avant le présent) indique que l'on compte les années avant 1950. Après calibration, nous avons obtenu une courbe qui, au lieu de la gaussienne initiale, comportait cinq maximums ! L'intervalle de confiance à deux déviations standards (probabilité de 95,4 pour cent que l'âge vrai soit dans cet intervalle) allait pour cette raison de 1611 à 1446 avant notre ère, soit pas moins de 165 années (voir la figure 3). On voit qu'une datation unique ne saurait suffire pour confirmer une date d'historien.

La quasi-certitude surgit de la datation de plusieurs échantillons, mais à condition de savoir les ordonner dans le temps. C'est le mathématicien anglais Thomas Bayes (1701-1761) qui posa les bases de la méthode. Si l'on dispose d'une série de strates archéologiques non perturbées *a*, *b*, *c*, alors un échantillon provenant de la couche inférieure *a* doit être plus vieux qu'un échantillon issu de *b*, lequel sera plus ancien qu'un échantillon venant de *c*. La méthode statistique de Bayes permet alors de déduire de l'ordre de leurs âges et de leurs âges radiocarbone une estimation beaucoup plus précise de l'âge vrai de l'échantillon à dater.

Dans la pratique, on ne peut prélever sur les vestiges archéologiques – présents par milliers dans les musées – qu'une minuscule quantité de matière. À l'époque de Libby, cette contrainte posait de sérieux problèmes aux chercheurs, car ils dataient à l'aide d'un détecteur mesurant la radioactivité. La méthode est imprécise, car moins d'un milliardième des quelque 60 milliards d'atomes de carbone 14 présents dans un gramme de carbone de matière vivante se désintègre chaque minute. En pratique, on constate qu'un tel échantillon éjecte environ 13 électrons en moyenne par minute. Or l'obtention d'une précision de 0,3 pour cent exigerait la détection de 100 000 désintégrations ; cela ne peut être fait en un temps raisonnable que si plusieurs grammes d'échantillon sont disponibles...

Le progrès décisif en datation au radiocarbone est venu de la spectrométrie de masse par accélérateur ou SMA, une technique permettant de compter directement le nombre d'atomes de carbone 14 au sein de l'échantillon (voir l'encadré page précédente). Grâce à la SMA, la masse d'échantillon nécessaire ne se compte plus qu'en milligrammes, et le temps de mesure est raccourci !

Fort de ces possibilités, Ch. Bronk Ramsey a rassemblé autour de lui une équipe internationale de chercheurs (dont les auteurs de ces lignes) pour préciser la chronologie égyptienne. Afin d'éviter le biais marin, nous avons choisi dans les musées européens et américains des échantillons provenant tous de plantes terrestres. Nous avons aussi exclu tous ceux qui étaient passés par les fleuves et les lacs d'eau douce, car la dissolution de carbonates pauvres en carbone 14 y introduit aussi un biais. De même, le bois et les charbons de bois ont dû être exclus : ils auraient pu provenir de l'intérieur d'un tronc, alors que l'événement archéologique à dater ne s'est produit que bien après l'abattage de l'arbre. Les os non plus ne pouvaient être employés, car les organismes dont ils provenaient ont pu consommer des nourritures de la mer, ce qui réintroduirait le biais marin.

Un travail de fourmi pour obtenir des datations fiables

Malgré toutes ces restrictions, nous avons pu rassembler 211 échantillons égyptiens de l'Ancien Empire, du Moyen Empire et du Nouvel Empire. Il s'agissait de fruits, de grains, de restes de plantes à courte durée de vie (fleurs par exemple), de papyrus, de tissus, etc. Tous pouvaient être clairement attribués à une période. Ils ont été datés une première fois à Oxford, puis la mesure a été refaite indépendamment dans deux laboratoires pratiquant la SMA : le Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14) du CEA à Saclay, en France (avec Anita Quiles et Christophe Moreau), et le nôtre à Vienne, en Autriche. Certains d'entre eux ont été plusieurs fois analysés après un nettoyage chimique soigneux pour exclure toute contamination. Résultat : sur les 211 datations réalisées, seulement 23 ont dû être ignorées à cause de l'incohérence des différentes mesures, de sorte que nous avons pu produire 188 datations fiables.

Nous avons ensuite pris en compte les contextes de chaque date, tels que l'ordre des règnes et leurs durées, afin d'élaborer par la statistique de Bayes un modèle chronologique. Un léger biais tout juste découvert par l'équipe d'Oxford a même été pris en compte. À partir d'échantillons d'âges connus des XVIII^e et XIX^e siècles, nos collègues anglais ont en effet découvert que la latitude de l'Égypte induit un décalage

LES AUTEURS



Eva Maria WILD et Walter KUTSCHERA, professeurs de physique à l'Université de Vienne, en Autriche, sont spécialistes en datation par spectrométrie de masse par accélérateur.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Ch. Bronk Ramsey *et al.*, Radiocarbon-based chronology for Dynastic Egypt, *Science*, vol. 328, pp. 1554-1557, 2010.

M. W. Dee *et al.*, Investigating the likelihood of a reservoir offset in the radiocarbon record for ancient Egypt, *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, pp. 687-693, 2010.

E. Hornung *et al.*, Ancient Egyptian Chronology, *Handbook of Oriental Studies*, Brill Academic Publishers, vol. 1, n° 83, Leyde, 2006.

C. Laj, A. Mazaud et J.-C. Duplessy, La datation par le carbone 14, *Dossier Pour la Science* n°42, janvier-mars 2004.

I. Shaw, *The Oxford History of Ancient Egypt*, Oxford University Press, 2003.

K. Spence, Ancient Egyptian chronology and the astronomical orientation of pyramids, *Nature*, vol. 408, pp. 320-324, 2000.

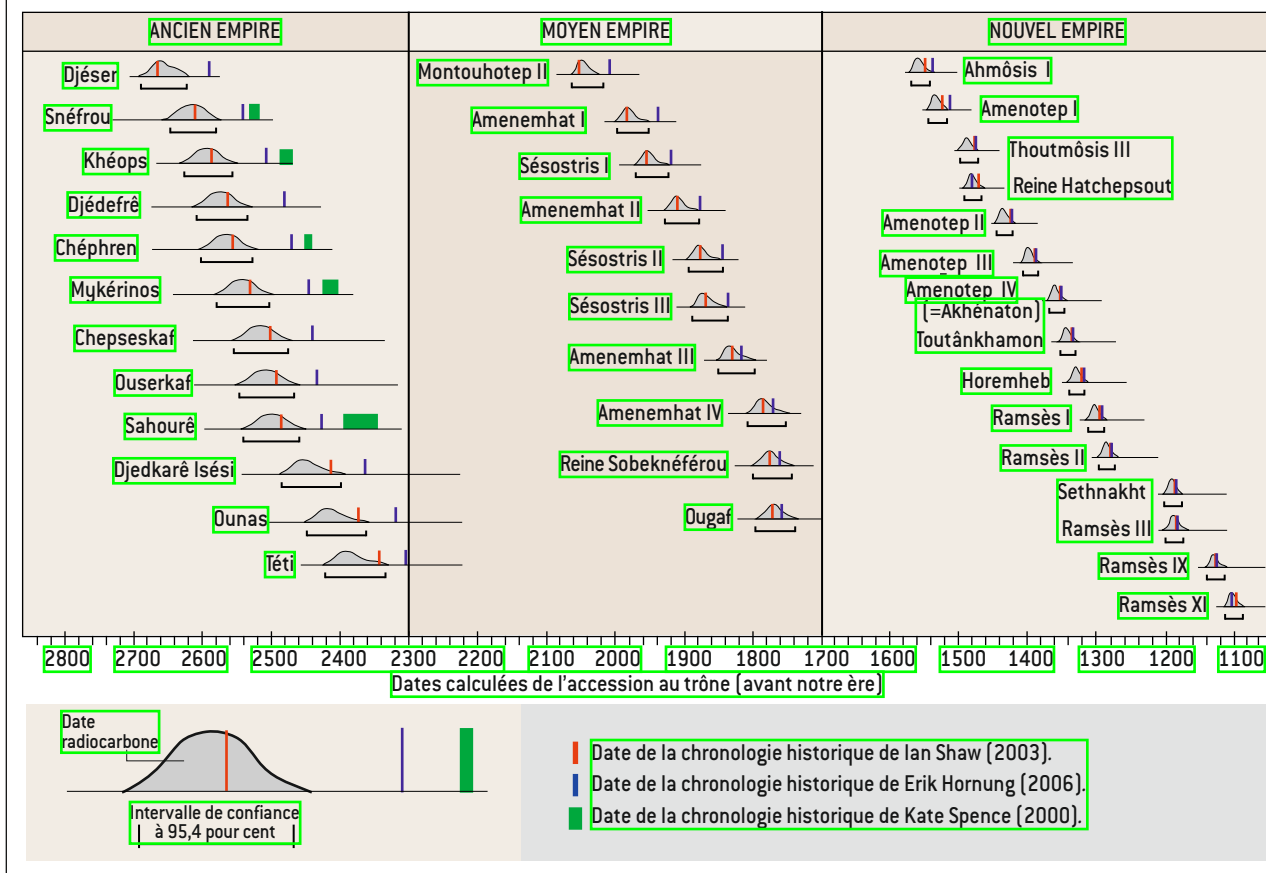
S. Bowman, *Interpreting the Past - Radiocarbon Dating*, British Museum Press, 1990.

J. R. Arnold et W. F. Libby, Age determinations by radiocarbon content : checks with samples of known age, *Science*, vol. 110, pp. 678-680, 1949.

LES DATES ÉGYPTIENNES CERTIFIÉES AU CARBONE 14

D Plusieurs équipes de chercheurs se sont associées pour asseoir la chronologie égyptienne sur des datations au radiocarbone aussi fiables que possible compte tenu des différents biais. Ces datations, ou plutôt les lois de probabilité des dates de l'événement, sont comparées aux

prédictions faites par les historiens (*traits rouges, verts et bleus*). Les intervalles indiqués sous les courbes de probabilité sont les intervalles de confiance à 95 pour cent, c'est-à-dire que la date réelle de l'événement est comprise dans cet intervalle avec une probabilité de 95 pour cent.



Spectrum der Wissenschaften | Magazin für die Wissenschaft | Science, Vol. 328, 2010

de 19 ± 5 ans des âges radiocarbone. La raison en est simple: la concentration en radiocarbone de la troposphère (la couche inférieure de l'atmosphère) varie d'environ quatre millièmes entre l'été et l'hiver par le jeu de ses échanges avec la stratosphère (la couche atmosphérique située au-dessus). C'est pourquoi les plantes des latitudes tempérées, qui poussent surtout au printemps, incorporent moins de radiocarbone que les plantes d'Égypte, qui poussent surtout pendant les mois d'hiver. L'âge radiocarbone des plantes égyptiennes en est légèrement accru. La correction calculée par nos collègues britanniques est fondée sur l'hypothèse qu'avant la construction en 1902 du premier barrage d'Assouan, l'Égypte a connu des conditions climatiques égales pendant très longtemps.

Le modèle chronologique que nous avons finalement obtenu est d'une précision inédite en égyptologie. En ce qui concerne le Nouvel Empire, les dates de

règne ont pu être précisées à 24 ans près, et il s'avère que c'est la chronologie haute – qui fait commencer les règnes environ dix ans plus tôt – qui coïncide le mieux avec nos datations. Pour l'Ancien Empire et le Moyen Empire, beaucoup moins d'échantillons étaient disponibles, mais nos résultats sont assez précis pour constater un meilleur accord avec la chronologie haute. Aucune affirmation certaine ne peut être faite dans le cas du Moyen Empire, mais la chronologie haute semble là aussi mieux en accord avec les datations.

Accords et désaccords

Il est remarquable que la méthode du radiocarbone contredise si peu les dates des historiens, qu'elle ne fait que corriger de façon minime. *A priori*, nous ne pouvions nous y attendre: il est si souvent arrivé dans le passé que les datations contredisent les chronologies historiques...

À considérer toutes les sources d'erreur que nous avons dû identifier, il se peut que les différences constatées proviennent d'une mauvaise prise en compte de l'un des biais possibles. La date radiocarbone d'un échantillon de bois indique par exemple la date d'abattage de l'arbre dont il provient. Or un bois peut avoir été utilisé et réutilisé des dizaines d'années ou des siècles avant de finir dans une couche archéologique... Autre possibilité: celle qu'une source historique ne soit pas aussi fiable qu'elle en a l'air...

Tell el Dab'a, dans le delta du Nil, illustre-t-il les effets d'un biais ignoré? Sur ce site occupé depuis le milieu du Moyen Empire, les datations physiques et celles des historiens divergent de 100 à 150 ans... et les physiciens sont aussi sûrs d'eux-mêmes que les historiens... Gageons que la coopération croissante entre ces deux genres de scientifiques résoudra bientôt cette énigme.



GMF

C'EST RASSURANT DE POUVOIR COMPTER
SUR UNE **ÉPARGNE SOLIDE
ET PERFORMANTE.**



ÉPARGNE
3,90%*
TAUX SERVI EN 2010

À LA GMF,
VOUS CONSTRUISEZ
VOTRE AVENIR
EN TOUTE SÉRÉNITÉ !

Rendez-vous sur www.gmf.fr

ou appelez le  **N° Vert 0 800 88 11 62**

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE



Assurément Humain

*3,90% - Taux net servi en 2010, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour les contrats d'assurance-vie Altineo, Compte Libre Croissance et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. GMF VIE - Société anonyme au capital de 169 787 440 € entièrement versé. Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris B 315 814 806 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 - Adresse postale : 10 - 14, avenue Louis Armand - 95127 Ermont Cedex.

Archéologie

Le casse-tête de la chronologie égyptienne





Cœuvres humaines, les calendriers changent avec la société. Tandis que l'année de parution du présent magazine désigne le temps écoulé depuis la mort du Christ, d'après les calculs faits vers 525 par un moine nommé Denys le Petit, le calendrier musulman se fonde sur le départ de Mahomet pour Médine. Ainsi, depuis le 26 novembre 2011 du calendrier chrétien, nous sommes dans la 1 433^e année musulmane. Et nous sommes aussi dans la 5 772^e année après la création du monde, d'après le calendrier juif...

Pour leur part, les anciens Égyptiens n'avaient pas de calendrier linéaire démarquant en un certain point temporel. Cela n'empêche pas que nous parvenions à placer dans le temps la construction de la pyramide de Khéops ou les dates du règne de son constructeur. Ces déterminations sont faites par deux types de méthodes : la datation physique, d'une part, et la datation historique, d'autre part.

lors des enterrements royaux sont un autre exemple de sources de données fiables : récemment, elles nous ont permis de fixer à 14 ans la durée du règne du pharaon Horemheb, jusqu'alors très débattue.

De même, les allusions astronomiques, telles que le lever héliaque (juste avant le soleil) de l'étoile Sirius sur l'horizon ou la mention d'une nouvelle lune, peuvent aider. Les astronomes d'aujourd'hui savent les traduire en dates absolues, qui servent ensuite à placer des époques entières dans notre calendrier. Les événements historiques mentionnés à la fois en Égypte et dans les textes d'autres cultures du Proche-Orient permettent aussi de déterminer certaines dates.

Aux époques où l'Égypte était unie, c'est-à-dire pendant l'Ancien, le Moyen, le Nouvel Empire et la Basse Époque qui suivit, nous connaissons presque parfaitement la succession des règnes. Il en va tout autrement pour les périodes dites intermédiaires, qui connurent des boule-

Établir une chronologie fiable pour l'Égypte ancienne est une entreprise de longue haleine. Elle se fonde sur des données historiques nombreuses et variées, que l'on doit aussi confronter aux datations physiques.

Thomas Schneider

L'ESSENTIEL

✓ L'histoire de l'Égypte antique se divise en périodes d'unité politique et des « périodes intermédiaires ».

✓ Les anciens Égyptiens n'avaient pas de calendrier linéaire. Les historiens construisent donc leur chronologie en exploitant des milliers de données éparées.

✓ Ils procèdent en partant d'une date égyptienne sûre du 1^{er} millénaire avant notre ère, puis remontent le temps. Sur ce chemin, les principaux obstacles qu'ils rencontrent se trouvent dans les périodes intermédiaires.

Les datations physiques, tout particulièrement la datation par le carbone 14, la plus utilisée d'entre elles, permettent par exemple d'affirmer qu'avec une probabilité de 95 pour cent, le règne de Khéops – le constructeur de la pyramide du même nom – se situe entre 2640 et 2560 avant notre ère (dans la suite, on omettra la mention « avant notre ère », qui sera sous-entendue pour toutes les dates indiquées).

Des datations peuvent aussi être obtenues en analysant scrupuleusement des sources écrites. Depuis plus de 200 ans, cette approche est à l'origine de toute une tradition, dans laquelle se sont engagées des générations de chercheurs. Les anciens Égyptiens nous ont en effet livré des milliers de données temporelles, que les égyptologues exploitent pour ordonner la succession des règnes. Il s'agira par exemple d'inscriptions mentionnant le règne d'un pharaon ou l'une de ses campagnes militaires. Les amphores de vin que l'on apportait dans la vallée des Rois

versements sociaux et des luttes entre rois régionaux. Les documents relatifs à ces périodes manquent en effet, peut-être à cause du chaos dynastique ambiant. Nos sources les plus importantes pour ces périodes sont les listes de rois de l'administration égyptienne, qui fixaient les noms des souverains recevant un culte dans les temples.

Hérodote (482-420 avant notre ère) raconte dans son deuxième livre une visite, sans doute fictive, qu'il aurait faite en Égypte vers 450. Il y livre une preuve de l'âge de la civilisation égyptienne, pour lui proprement incroyable : *Après ce roi*

1. LA LISTE ROYALE DU TEMPLE FUNÉRAIRE de Séthi I^{er}, pharaon qui accéda au trône vers 1300, comporte 75 ancêtres. Bien qu'elle omette certains rois, elle constitue une source importante pour les chercheurs travaillant à établir la chronologie historique de l'Égypte. La table reproduite ci-contre en est une copie fragmentaire, qui provient du temple funéraire de Ramsès II. Elle est conservée au **British Museum**.

L'AUTEUR



Thomas SCHNEIDER, égyptologue, enseigne et travaille à l'Université de Colombie-Britannique, à Vancouver au Canada.

[Hérodote veut dire le premier pharaon], les prêtres comptèrent dans un livre 330 souverains successifs. Or, lui avaient expliqué les prêtres, un roi a régné à chaque génération, et comme trois générations couvrent 100 ans, cela produit un âge pour la civilisation égyptienne de quelque 10 000 ans. Le raisonnement simpliste du « père de l'histoire » est faux, puisque les règnes de nombreux souverains égyptiens n'ont duré que quelques années. Mais le témoignage d'Hérodote prouve que les prêtres établissaient des listes de rois jusque dans la période hellénistique et romaine.

Vers le milieu du III^e siècle, le prêtre Manéthon utilisa ces listes pour écrire une première histoire de l'Égypte – l'*Ægyptiaca*. Son but était de familiariser la nouvelle élite grecque (ou de culture grecque) avec le passé de son pays. Il utilisa pour

cela la méthode pragmatique, toujours employée aujourd'hui, consistant à regrouper les rois en dynastie, c'est-à-dire en succession de rois de même famille ou de même résidence. Son histoire commence avec le règne mythique des dieux et se poursuit jusqu'aux derniers pharaons et la conquête de l'Égypte par Alexandre le Grand. Manéthon cite pas moins de 31 dynasties et 473 souverains. Nous ne disposons malheureusement plus de l'*Ægyptiaca*, mais seulement d'extraits contenus dans des œuvres d'auteurs chrétiens et juifs telles la *Chronique* de Sextus Julius Africanus (la première histoire du christianisme), qui date du III^e siècle, ou l'*Histoire ecclésiastique* d'Eusèbe de Césarée, qui date du V^e siècle.

Un indice précieux : le taureau sacré

La seule liste de souverains de l'Égypte antique qui nous soit parvenue se trouve sur un fragment du Papyrus de Turin, mais elle s'arrête avant le Nouvel Empire, vers 1530. Nombreuses sont, sinon, les listes de rois utilisées dans les temples culturels, par exemple celle du temple funéraire de Séthi I^{er} à Abydos vers 1300 (voir la figure 1). Ces sources sont malheureusement imprécises et ne mentionnent pas les durées de règne.

Il existe des annales gravées sur stèles, où sont mentionnés des événements marquants tels que l'érection d'un monument ou une expédition militaire réussie. Constituant une sorte de proclamation de reconnaissance religieuse, ces stèles étaient érigées dans les temples. La pierre de Palerme, issue de l'Ancien Empire, est à cet égard particulièrement importante ; il en est de même pour le Moyen Empire avec les annales d'Amenemhat II, qui ne sont connues que depuis 30 ans. Toutefois, ces textes aussi ont de nombreuses lacunes, sans parler de leur état de conservations souvent très imparfait. Il faut les confronter à d'autres sources pour obtenir des informations fiables.

Comment établit-on une chronologie historique ? Son point terminal doit être le début du règne du roi Taharqa en 690, qui est la seule date certaine de toute l'histoire égyptienne. Pour la plupart des égyptologues, la date d'accession au trône de Chabaka, 721, est en revanche discutable. Les deux rois font partie des Kouchites, donc de la XXV^e dynastie originaire de



2. SYMBOLE DE FERTILITÉ, LE TAUREAU APIS incarnait le très ancien dieu égyptien Ptah. L'animal sacré était choisi par les prêtres qui consignaient ses dates de naissance, d'intronisation et de décès. Ces données, conservées par des stèles de la nécropole de Saqqarah, constituent une source importante pour l'établissement de la chronologie historique.

Nubie, qui a réuni les royaumes rivaux constituant l'Égypte éclatée de la Troisième Période intermédiaire, ouvrant ainsi la Basse Époque.

La XXI^e dynastie, placée dans la Troisième Période intermédiaire, et le Nouvel Empire ne posent pas non plus de problème de datation. Ces époques comprennent notamment les règnes de Toutankhamon (XVIII^e dynastie) et Ramsès II (XIX^e dynastie). La période s'écoulant entre 956 et 721 est en revanche incertaine, ce qui nous oblige à construire un « pont temporel » enjambant plus de deux siècles, période où l'ordre des rois et les durées de règnes ne sont pas connus.

Les dates de vie de l'un des taureaux sacrés Apis (voir la figure 2) permettent d'établir ce pont. Sur une stèle de la nécropole de Saqqarah, on lit en effet que l'animal est « entré en fonction » sous le règne de Chéchonq V, un roi de la XXII^e dynastie, puis a été enterré sous Chabaka, au début de la XXV^e dynastie. On parvient ainsi à relier les rois kouchites – dont on sait avec certitude qu'ils se succèdent à partir de 690 – à la XXII^e dynastie, ce qui crée une continuité de régime depuis la XXII^e dynastie jusqu'à la réunification de l'Égypte par Piankhi, de la XXV^e dynastie (Chabaka étant le successeur de Piankhi). On a ainsi construit un pont temporel de 220 années !

Les huit rois de la XXI^e dynastie sont mieux documentés et ont régné 124 ans en tout. Il en résulte qu'à partir de l'accession au trône de Taharqa, vers 690, on peut remonter le temps jusqu'à la fin du Nouvel Empire, vers 1080. Pour ces XVIII^e et XX^e dynasties, particulièrement bien datées, on peut attribuer des durées de 246, 102 et 112 ans, soit un total de 460 années. On en déduit que le Nouvel Empire a commencé vers 1540, mais à 20 ou 30 ans près, notamment à cause des doutes pesant sur le dernier tiers de cette période.

Ces doutes pourraient être levés à l'aide des dates de nouvelles lunes des règnes de Thoutmôsis III et de Ramsès II. Dans les annales de ce dernier, par exemple, on lit que la bataille de Megiddo a eu lieu le vingtième jour du premier mois d'éte de sa vingt-troisième année de règne et que la lune était pleine. À partir de telles indications, les astronomes déterminent la date correspondante dans notre calendrier. Pour cela, il faut tenir compte du fait que les années égyptiennes solaires et lunaires, n'étant pas de même

VUE D'ENSEMBLE DE LA CHRONOLOGIE ÉGYPTIENNE Toutes les dates sont avant notre ère		
I ^{ère} dynastie	3000-2840	environ
II ^e dynastie	2840-2730	environ
Ancien Empire	2730-2230	environ
III ^e dynastie	2730-2660	environ
IV ^e dynastie	2660-2530	environ
V ^e dynastie	2530-2380	environ
VI ^e dynastie	2380-2230	environ
7 ^{ème} Période intermédiaire	2230-2030	environ
Moyen Empire et II ^e Période intermédiaire	2030-1540	
XII ^e dynastie	1983-1801	
Sésostris III	1873-1854	
VII ^e année de son règne	1866	
XV ^e dynastie	1648-1540	
Nouvel Empire	1540-1080	
XVIII ^e dynastie	1540-1294	
XIX ^e dynastie	1294-1192	
XX ^e dynastie	1192-1080	
III ^e Période intermédiaire	1080-664	
XXI ^e dynastie	1080-956	
XXII ^e dynastie	956-736	
Sheshonq V	774-736	
XXIII ^e dynastie de Haute Égypte	956-736 environ	
XXIV ^e dynastie ou Royaume de Saïs dans le delta	727-715	
XXV ^e dynastie (Kouchites)	733-664	
Piankhi (depuis la conquête de l'Égypte)	733-721	
Chabaka	721-706	
Schebitku	706-690	
Taharqa	690-664	
Période assyrienne	671-664	
Basse Époque	664-323	
XXVI ^e dynastie (Saïte)	664-525	
XXVII ^e dynastie	525-404	
XXVIII ^e dynastie	404-399	
XXIX ^e dynastie	399-380	
XXX ^e dynastie	380-343	
Domination perse [« XXXI ^e dynastie »]	343-332	
Alexandre le Grand	332-323	

3. LA CHRONOLOGIE ÉGYPTIENNE telle qu'elle apparaît aujourd'hui dans ses grandes lignes est précise sur une période s'étendant sur environ 3 000 ans. Cette chronologie comprend trois grandes ères d'unité politique de l'Égypte pharaonique, dénommées l'Ancien Empire, le Moyen Empire et le Nouvel Empire. Elle se termine par une domination perse, suivie de périodes de domination grecque, puis romaine.

longueur, se chevauchaient. Ce n'est qu'au bout de 25 ans que le jour de la nouvelle lune coïncidait avec le même jour du calendrier solaire, puisque 309 mois lunaires (9 124,5 jours) représentaient la même longueur que les 300 mois solaires (9 125 jours). Cependant, des quasi-coïncidences, caractérisées par une différence de seulement un jour calendaire, s'étaient déjà produites pendant cette période après 11 et 14 ans. Or un jour d'écart est une imprécision très plausible chez des gens qui observaient les astres à l'œil nu... Du reste, des recherches récentes ont montré qu'une incertitude de plus d'un jour est fréquente dans l'observation des astres à l'œil nu. C'est pourquoi on doute aujourd'hui des indications égyptiennes de nouvelles lunes.

Chronologie haute ou basse ?

De ce fait, plusieurs dates d'accession au pouvoir de Ramsès II ont été proposées. Elles sont séparées de 11, 14 et 25 ans et correspondent aux années 1304, 1290 ou 1279. D'où les chronologies « haute » ou « basse » construites par les égyptologues pour le Nouvel Empire.

Les datations astronomiques passent aussi pour un moyen de franchir la Deuxième Période intermédiaire, celle qui précède le Nouvel Empire et se termine vers 1540. Cette période comprend les phases suivantes : la fin de la XIII^e dynastie, qui perdit son contrôle sur l'Égypte au milieu du XVII^e siècle ; des souverains locaux, que l'on cite en général sous les noms de XIV^e et de XVI^e dynasties ; une période durant laquelle un peuple issu d'Asie occidentale, les Hyksos, domina l'Est du delta et de vastes régions égyptiennes, pendant que la XVII^e dynastie régnait dans la région de Thèbes. C'est cette dernière qui finira par réunifier la vallée du Nil, fondant ainsi le Nouvel Empire. Beaucoup des souverains de cette période sont mal documentés ; et il est difficile de repérer des événements mentionnés dans les chroniques non égyptiennes, ainsi que des recouvrements entre régimes.

Pour franchir et ancrer cette période intermédiaire, on a souvent utilisé une date sothiaque remontant à la troisième année du règne de Sésostris III, le cinquième souverain de la XII^e dynastie. Il s'agit de la mention du lever héliaque de Sothis (Sirius) dans les documents



© Gami Dadi OnCorbis



© ANTONIO DI NINO

4. D'UN EMPIRE À L'AUTRE. Sésostri III (à gauche) est un souverain du Moyen Empire. Ahmôsis I^{er} (à droite) est le tout premier pharaon du Nouvel Empire. Entre les deux, la Deuxième Période inter-

médiaire a longtemps été difficile à dater. La situation s'est débloquée quand les historiens ont trouvé et pris en compte les dates indiquées dans les tombes des hauts fonctionnaires.

✓ BIBLIOGRAPHIE

E. Hornung et al. (dir.), *Ancient Egyptian chronology, Handbook of Oriental Studies 1*, vol. 83., Brill Academic Publishers, Leyde, 2006.

Th. Schneider, *Contributions to the chronology of the New Kingdom and the Third Intermediate Period*, *Ägypten & Levante / Egypt & the Levant*, vol. 20, pp. 373-403, 2010.

J. Assmann, *Le temps double de l'Égypte ancienne*, *Pour la Science* n° 397, novembre 2010.

Th. Schneider, *Das Ende der kurzen Chronologie : eine kritische Bilanz der Debatte zur absoluten Datierung des Mittleren Reiches und der Zweiten Zwischenzeit*, *Ägypten & Levante / Egypt & the Levant*, vol. 18, pp. 275-313, 2008.

administratifs de la ville d'El-Lahun, un village de travailleurs funéraires situé au Sud de Memphis. Les calculs modernes conduisent à fixer cette apparition vers 1866 et, par là, à 1873 l'année d'accession au trône de Sésostri III ; mais là encore, des doutes pèsent sur la fiabilité des observations du ciel.

Les fonctionnaires, plus fiables que les pharaons

C'est pourquoi, depuis peu, on préfère plutôt essayer de franchir la Deuxième Période intermédiaire par l'histoire. Une série de dates de règnes connues depuis longtemps pour cette période montre qu'entre la septième année de Sésostri III (la date possible du lever héliaque de Sothis) et la première année de règne d'Ahmôsis I^{er}, au moins 282 années se sont écoulées.

Ce ne sont pas les pharaons, mais les fonctionnaires qui nous éclairent sur cette période de presque trois siècles. Les chefs-lieux de nomes (divisions administratives) poursuivent en effet leur vie quelles que soient les circonstances politiques. Ainsi,

quel que soit le règne, la puissance et la réputation d'un haut fonctionnaire peuvent être grandes, ce qui se traduit dans son culte funéraire. Des inscriptions vantant les vies et les actes des nomarques (gouverneurs) d'El-Kab, en Haute Égypte, ont ainsi permis de reconstruire une généalogie dont les 13 générations s'étendent du début de la Deuxième Période intermédiaire jusqu'au début du Nouvel Empire. Une estimation montre que depuis la septième année du règne de Sésostri III et la première d'Ahmôsis I^{er}, ce ne sont pas 282, mais 315, voire 355 années qui se sont écoulées si l'on calcule avec des générations de 30 ans au lieu de 25 ans.

Récemment, j'ai moi-même essayé d'obtenir les bons chiffres à partir des dates de règnes contradictoires livrées par les chroniqueurs égyptiens. Si mes calculs sont corrects, on aurait une Deuxième Période intermédiaire s'étalant sur 327 à 352 ans et un recouvrement des XIII^e et XVII^e dynasties sur 25 à 50 ans. Cela correspondrait non seulement au renouvellement des générations dans les biographies des nomarques d'El-Kab, mais aussi à la date sothiaque mentionnée plus haut. Quoi qu'il en soit, tous ces chiffres demeurent

incertains et nul ne peut dire avec certitude si le Nouvel Empire a commencé en l'an 1540 ou cinq ans plus tôt !

Avec la XII^e dynastie, à laquelle appartenait Sésotris III, nous foulons à nouveau un sol ferme ; cette dynastie a duré 182 ans. En fonction de la durée de la Deuxième Période intermédiaire, elle a donc dû commencer entre 2000 et 1918.

Le Moyen Empire fut précédé par une période où l'Égypte comptait de petits États : la Première Période intermédiaire. Au sein de cette époque, les 185 années citées par le prêtre Manéthon pour les règnes des rois d'Hérakleopolis (le plus important royaume de cette phase intermédiaire) jusqu'à la réunification, à la fin de la XI^e dynastie (entre 2040 et 2020), semblent pouvoir correspondre à la vérité. Les dates relatives aux fonctionnaires régionaux ainsi que les découvertes archéologiques dans les nécropoles de la Première Période intermédiaire correspondent à une durée d'environ 200 ans.

L'Ancien Empire s'est terminé vers l'an 2230, ce qui nous amène à l'ère des constructeurs de pyramide connus. Le

plus gros problème chronologique pour cette période est le système de dates alors utilisé. En effet, à partir de la XI^e dynastie, les Égyptiens ont daté les événements en fonction du début du règne des souverains ; auparavant, on mentionnait les « années de recensement des troupeaux », c'est-à-dire les années de levée d'impôts. Les spécialistes ont longtemps pensé que ces levées étaient séparées de deux ans, car à côté de la mention « année du recensement », on trouve aussi de temps en temps une mention « année après le recensement ». Entre-temps, il est devenu clair que soit les Égyptiens n'avaient pas de méthode régulière de prélèvement des impôts, soit nous ne l'avons pas encore comprise.

A posteriori, les listes de rois des époques tardives n'aident pas, car leurs auteurs, manifestement, ont aussi confondu ces données avec des années de règne. Les constructeurs des grandes pyramides de la IV^e dynastie, les rois Snéfrou, Khéops et Chéphren, ont sans doute régné bien plus longtemps que ne le rapportent les chroniqueurs égyptiens, à

en croire les estimations récentes des durées de construction.

Le calcul à rebours fondé sur les dates de recensement des troupeaux depuis la Première Période intermédiaire jusqu'à l'Ancien Empire et sur toute une série d'autres indices comporte donc de très grandes incertitudes. Il conduit à placer la construction de la pyramide de Khéops au XXVI^e siècle.

L'histoire complétée par la physique

C'est là qu'intervient la physique : une équipe internationale vient en effet de faire savoir que les dates obtenues par la méthode du radiocarbone coïncident bien avec le résultat de la reconstruction de la chronologie par la méthode historique (voir *L'Égypte ancienne à l'aune du radiocarbone*, page 20). Ces datations physiques fixent surtout les plus anciennes périodes de l'histoire égyptienne, pour lesquelles la méthode astronomique est controversée ; elles complètent ainsi idéalement la chronologie historique. ■



Muséum national d'Histoire naturelle

L'extinction d'espèce Histoire d'un concept & enjeux éthiques

Julien Delord

« Durant les neuf derniers millénaires, l'humanité s'est conduite en tant qu'espèce pionnière invasive. Cette espèce est individualiste, agressive et envahissante. Elle tente d'exterminer ou de supprimer d'autres espèces ». Et en toute inconscience, pourrait-on ajouter au constat implacable du philosophe Arne Naess ! Comment cet événement écologique massif, cette destruction inconsidérée de nos espèces-sœurs a pu rester si longtemps invisible et demeurer si obstinément impensée ? À moins que les tentatives de reconnaissance et de formalisation de ce phénomène ne se soient heurtées à des résistances d'ordre théologique, scientifique et culturelle profondément ancrées... Mais alors, comment s'assurer que cette « sixième extinction de masse », en tant que conséquence (éco-) logique du développement de l'espèce humaine, peut légitimement faire l'objet d'une condamnation morale ? Sur quelles bases éthiques fonder la conservation des espèces et proposer une norme de vie commune au sein de l'odyssée de l'évolution ? C'est en réponse à ces questionnements essentiels où s'entrecroisent les perspectives millénaires de l'histoire environnementale des civilisations humaines et l'urgence de la crise de la biodiversité contemporaine que ce livre suggère nombre d'éclaircissements historiques et philosophiques à même de nourrir une indispensable réflexion écologique.



ISBN 978-2-85653-656-8
170 x 240 mm • 140 figures quadri
692 p. • 45 € TTC • novembre 2010

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

Histoire des sciences

Astrophysique

À la recherche des **TROUS NOIRS** de masse

Jenny Greene

Pesant moins d'un million de masses solaires,
les trous noirs de masse intermédiaire
pourraient être la clef de l'énigme
de la formation de leurs homologues
supermassifs et des galaxies
qui les abritent.

intermédiaire

L'ESSENTIEL

✓ Moins d'un milliard d'années après le Big Bang, il existait déjà des trous noirs supermassifs d'un milliard de masses solaires. Or l'accrétion de matière ne suffit pas à expliquer une croissance aussi rapide.

✓ Ces monstres sont-ils issus de l'effondrement d'étoiles en de nombreux petits trous noirs, qui ont ensuite grossi et fusionné ? Ou bien ont-ils évolué à partir de germes déjà massifs, résultant de l'effondrement de grands nuages de gaz primordiaux ?

✓ La réponse viendra de la détection et de l'étude des trous noirs de masse intermédiaire. Les premiers résultats favorisent le scénario de l'effondrement de nuages de gaz.

Les astronomes savent depuis une dizaine d'années que presque toutes les grosses galaxies recèlent en leur centre un gigantesque trou noir – astre dont le champ de gravité est si intense que la lumière ne peut s'en échapper. En mourant, les étoiles peuvent s'effondrer en petits trous noirs, dont la masse va de trois à quelques dizaines de fois celle du Soleil. Ces trous noirs de masse stellaire sont cependant minuscules comparés aux monstres présents au cœur des galaxies, qui atteignent des millions, voire des milliards, de masses solaires.

Ces trous noirs supermassifs posent nombre de questions : pourquoi sont-ils si fréquents dans les galaxies ? Qui apparaît en premier, le trou noir central ou sa galaxie hôte ? Comment se sont-ils formés et ont-ils grandi ?

Le mystère est d'autant plus grand que des trous noirs supermassifs existaient déjà alors que l'Univers était encore très jeune. En juin 2011, un trou noir de deux milliards de masses solaires environ a été observé à une distance correspondant à 770 millions d'années après le Big Bang. Comment a-t-il pu devenir si massif en si peu de temps ?

Une croissance aussi rapide est étonnante, car les trous noirs, surtout connus dans l'imaginaire collectif pour aspirer le gaz et les étoiles qui passent à leur portée, sont aussi très efficaces pour « souffler » la matière environnante. Le gaz qui tombe sur un trou noir se met à tourner au sein d'un énorme disque, le disque d'accrétion. Échauffé par les frottements, en particulier à l'approche du point de non-retour sur le bord interne du disque, le gaz rayonne de façon intense, notamment en rayons X. Ce rayonnement repousse le reste de la matière en chute sur le trou noir, ce qui limite le rythme de croissance de l'astre par accrétion.

Les calculs indiquent qu'un trou noir qui accumule de la matière en continu au rythme le plus rapide possible double de masse tous les 50 millions d'années. C'est impressionnant, mais trop lent pour qu'un trou noir de masse stellaire devienne un monstre d'un milliard de masses solaires en moins d'un milliard d'années !

Les astrophysiciens ont proposé deux scénarios généraux de formation des trous noirs supermassifs. Le premier, avancé il y a déjà de nombreuses années, suppose que leurs germes étaient de gros trous noirs, vestiges d'étoiles défunctes. Les premières

L'AUTEUR



Jenny GREENE est maître de conférences en astronomie à l'Université de Princeton, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Greene, Big black hole found in tiny galaxy, *Nature*, vol. 470, pp. 45-46, 2011.

J. Kormendy et al., Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges, *Nature*, vol. 469, pp. 374-376, 2011.

M. Volonteri, Formation of supermassive black holes, *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 18(3), pp. 279-315, 2010.

J. Laval, Les trous noirs de masse intermédiaire, *Pour la Science* n° 372, octobre 2008, http://bit.ly/372_lavalle.

J. Greene et L. Ho, Active galactic nuclei with candidate intermediate-mass black holes, *Astrophysical Journal*, vol. 610(2), pp. 722-736, 2004.

A. Filippenko et L. Ho, A low-mass central black hole in the bulgeless Seyfert 1 galaxy NGC 4395, *Astrophysical Journal*, vol. 588(1), pp. L13-L16, 2003.

étoiles qui se sont formées dans l'Univers étaient sans doute extrêmement massives comparées au Soleil et aux autres étoiles des générations suivantes. Le gaz primordial ne contenait en effet pas encore assez d'éléments lourds, qui facilitent le refroidissement et la formation de grumeaux plus petits lorsque les nuages de gaz se contractent. Les très grosses étoiles qui en auraient résulté se seraient consumées rapidement et auraient engendré des trous noirs d'une centaine de masses solaires. Mais comment faire grossir ces germes plus vite que par simple accréation ?

Dans un amas stellaire dense, où les étoiles les plus grosses (et les trous noirs) ont tendance à se regrouper près du centre, un trou noir central massif pourrait rapidement croître jusqu'à 10 000 masses solaires en avalant d'autres trous noirs, dépassant ainsi le rythme d'accréation limite habituel. La croissance jusqu'au stade de trou noir supermassif pourrait se poursuivre par une accréation plus ordinaire, peut-être avec d'autres trous noirs de belle taille au menu.

Cependant, la découverte des trous noirs supermassifs très précoces pose la question de savoir si cette phase initiale de croissance accélérée est suffisante. Les astrophysiciens ont ainsi cherché des mécanismes alternatifs engendrant des germes de trous noirs plus gros que ceux formés à la mort des étoiles primitives.

La distribution de masse des trous noirs indique leur origine

Pour ce faire, une possibilité est de sauter les étapes intermédiaires, à savoir les étoiles : un gros nuage de gaz s'effondrerait pour former directement un trou noir de 10 000 à 100 000 masses solaires, bien plus gros que celui issu d'une étoile. Ce processus offre, en théorie, davantage de latitude pour former des trous noirs supermassifs précoces. Ce type d'effondrement direct ne se produit plus dans l'Univers aujourd'hui, car la teneur en éléments lourds du gaz a beaucoup augmenté, mais les conditions étaient différentes dans sa jeunesse.

Malheureusement, il est difficile de déterminer lequel de ces deux scénarios correspond à la réalité, c'est-à-dire de savoir si les germes des trous noirs supermassifs étaient de taille stellaire, ou s'ils étaient issus de l'effondrement de gros nuages

interstellaires. Malgré les progrès des télescopes, on ne peut observer des « bébés trous noirs supermassifs » en train de commencer leur croissance dans les premiers âges de l'Univers. C'est pourquoi mes collègues et moi avons adopté une autre stratégie : chercher des germes qui, pour une raison ou une autre, auraient survécu jusqu'à nos jours sans devenir supermassifs.

Si les germes de trous noirs supermassifs étaient des résidus d'étoiles, nous devrions détecter de nombreux rescapés, à la fois au centre et à la périphérie des galaxies, car les étoiles primordiales défunctes devaient être réparties partout dans la Galaxie. Nous devrions aussi observer un éventail continu de masses allant de 100 à 100 000 masses solaires, car la croissance de ces germes serait susceptible d'avoir été interrompue, par manque de matériau à agréger, à n'importe quel stade de la croissance.

En revanche, si les amorces de trous noirs supermassifs se sont formées surtout par effondrement direct de nuages de gaz, alors il devrait y avoir assez peu de survivants : le processus d'effondrement direct doit être plus rare que les implosions d'étoiles. Au lieu d'un large éventail de masses, nous ne devrions trouver que des restes dépassant 100 000 masses solaires, la masse typique donnée par les modèles théoriques d'effondrement direct.

Avec d'autres chercheurs, j'ai donc entrepris de scruter le ciel à la recherche d'un nouveau type de trous noirs, qui ne seraient ni de masse stellaire ni supermassifs, mais entre les deux : les trous noirs de masse intermédiaire. Il s'agissait de voir si leur fréquence et leur distribution de masse s'accordent mieux avec le modèle de l'effondrement stellaire ou avec celui de l'effondrement gazeux. Quand nous nous sommes lancés dans cette entreprise il y a sept ans, elle ne semblait guère prometteuse. Un seul trou noir intermédiaire était connu, et il était considéré comme une anomalie. Mais depuis, nous en avons trouvé des centaines.

Dans la suite, j'inclurai dans la catégorie des trous noirs intermédiaires ceux dont la masse va de un millier à deux millions de masses solaires. Cette limite supérieure est un peu arbitraire, mais elle exclut les plus petits des trous noirs supermassifs connus, tel celui de notre Galaxie, qui dépasse à peine quatre millions de masses solaires. Dans tous les cas, la frontière est par nature floue. En pratique, la mesure

de la masse d'un trou noir est souvent très incertaine. Les masses de notre première série de trous noirs intermédiaires ont par exemple été revues à la hausse d'un facteur deux il y a quelques années, lorsqu'un des paramètres utilisés dans les calculs a été ajusté pour tenir compte de nouvelles données. Mais l'important est ce que nous allons découvrir dans les années à venir sur la population de trous noirs non supermassifs dans son ensemble, quelle que soit la façon dont on les définit. Ce que nous avons appris pour l'instant nous apporte déjà une vision nouvelle des interactions des trous noirs avec les galaxies qui les abritent.

Où chercher les trous noirs intermédiaires ?

Les trous noirs peuvent être mis en évidence de diverses façons. Des étoiles qui tournent rapidement sur des orbites très serrées autour du centre d'une galaxie sont par exemple révélatrices de la présence d'un trou noir supermassif. Les trous noirs de masse intermédiaire sont cependant bien trop petits pour que leur influence gravitationnelle trahisse leur présence. C'est pourquoi nous nous concentrons sur les trous noirs « actifs » – qui sont en train d'engloutir du gaz – parce que le matériau brûlant du disque d'accrétion émet en tombant un rayonnement intense.

Au fil de plusieurs décennies d'études, les astronomes sont parvenus à la conclusion que les trous noirs actifs se trouvent en général dans de grosses galaxies d'un certain type. Les galaxies massives se divisent en deux grandes familles. Les galaxies spirales, telle la nôtre, arborent un vaste disque d'étoiles en rotation. À l'inverse, les galaxies elliptiques sont d'énormes agglomérations plus ou moins sphériques d'étoiles. Certaines galaxies spirales ont en leur centre un bulbe semblable à une galaxie elliptique en modèle réduit. Les trous noirs actifs se trouvent pour la plupart dans les galaxies elliptiques et dans les galaxies spirales dotées d'un bulbe massif. En outre, presque tous les bulbes galactiques assez proches pour être étudiés en détail abritent un trou noir de quelques millions à quelques milliards de masses solaires ! Enfin, plus le bulbe est gros, plus le trou noir central est gros : la masse du trou noir vaut généralement un millième de celle du bulbe. Cette surprenante corrélation est en soi une énigme passionnante. Elle

LES GERMES DE TROUS NOIRS GÉANTS

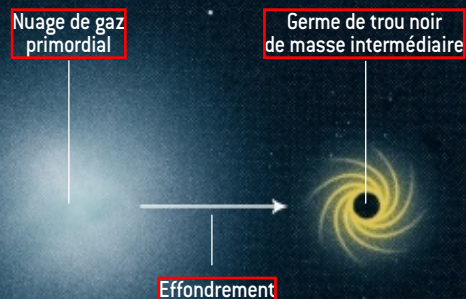
Des trous noirs monstrueux de plus d'un milliard de masses solaires existaient déjà dans la jeunesse de l'Univers. Selon la vision classique, ces trous noirs supermassifs ont grandi à partir de « germes », des trous noirs créés par l'effondrement d'une étoile. Cependant, un trou noir de masse stellaire ne peut pas grossir assez vite par simple accrétion de matière pour devenir supermassif en si peu de temps (a). Dès lors, comment des germes plus gros ont-ils pu se former ? Deux hypothèses s'affrontent : la croissance accélérée de trous noirs stellaires (b), et l'effondrement direct de nuages de gaz (c). La recherche des trous noirs vise à départager ces scénarios.



b Un gros trou noir de masse stellaire situé dans un amas d'étoiles pourrait rapidement atteindre 10 000 masses solaires en avalant d'autres trous noirs. Cette graine de masse intermédiaire pourrait ensuite devenir supermassive par accrétion du gaz.



c De façon alternative, un grand nuage de gaz primordial pourrait s'effondrer pour former directement un trou noir de masse intermédiaire, sans passer par l'étape « étoile ». Celui-ci grandirait ensuite également en se nourrissant de gaz.



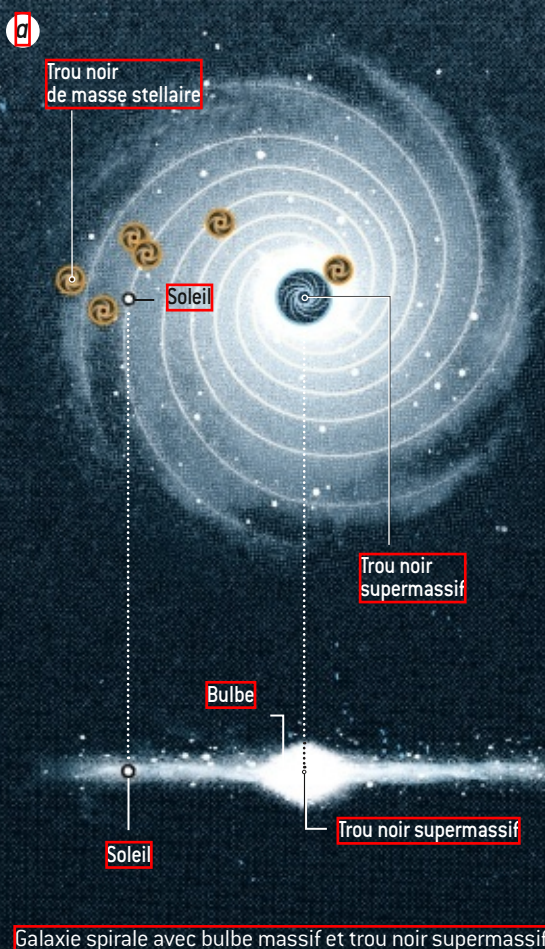
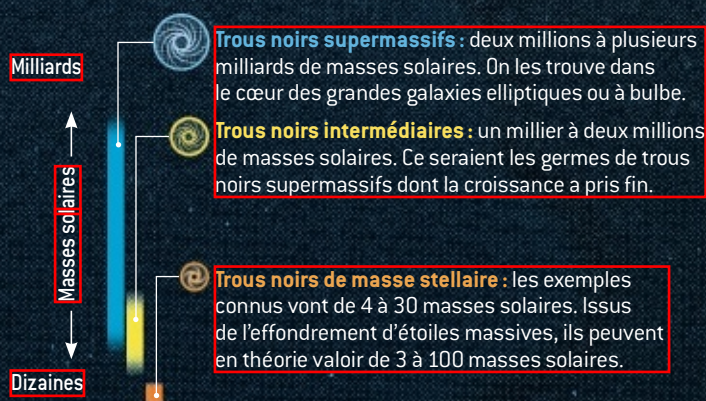
OÙ RÉSIDENT LES DIFFÉRENTS TYPES DE TROUS NOIRS

Il existe de nombreux types de galaxies, dont certains sont associés à la présence de trous noirs supermassifs. La Voie lactée (a) est une galaxie spirale, composée d'un disque et d'un gros renflement central dense en étoiles, ou bulbe. Elle abrite en son centre un trou noir supermassif de quatre millions de masses solaires (en bleu). De nombreux trous noirs de masse stellaire (en orange) ont également été détectés dans la Voie lactée.

Les galaxies à bulbe et les grandes galaxies elliptiques (b) semblent toutes abriter un trou noir supermassif central. À l'inverse, les trous noirs de masse intermédiaire (échelle ci-dessous, en jaune) sont plus fréquents dans les galaxies dépourvues de bulbe massif, comme les spirales sans bulbe (c).

Les classes de trous noirs

Les trous noirs connus se répartissent en trois familles, selon leur masse.



implique que les galaxies et les trous noirs supermassifs évoluent ensemble, par des mécanismes qui restent à élucider. De façon plus prosaïque, cette corrélation suggère qu'il faut rechercher les trous noirs intermédiaires dans les galaxies les plus petites. Mais lesquelles ?

Une curieuse petite galaxie nous a donné une idée. Mon directeur de thèse, Luis Ho, de l'Observatoire Carnegie, en Californie, a étudié environ 500 des galaxies brillantes les plus proches en 1995. Il avait constaté que si la plupart des galaxies à gros bulbe abritent des trous noirs actifs, ce n'est pas le cas pour les galaxies sans bulbe, à une exception près : NGC 4395, une galaxie spirale dotée d'un trou noir central actif et dépourvue de tout bulbe. Cette bizarrerie était en fait connue depuis 1989, mais considérée comme une anomalie. À l'exception de NGC 4395, le relevé de L. Ho confirmait la règle générale : on ne trouve pas de trous noirs dans les galaxies sans bulbe.

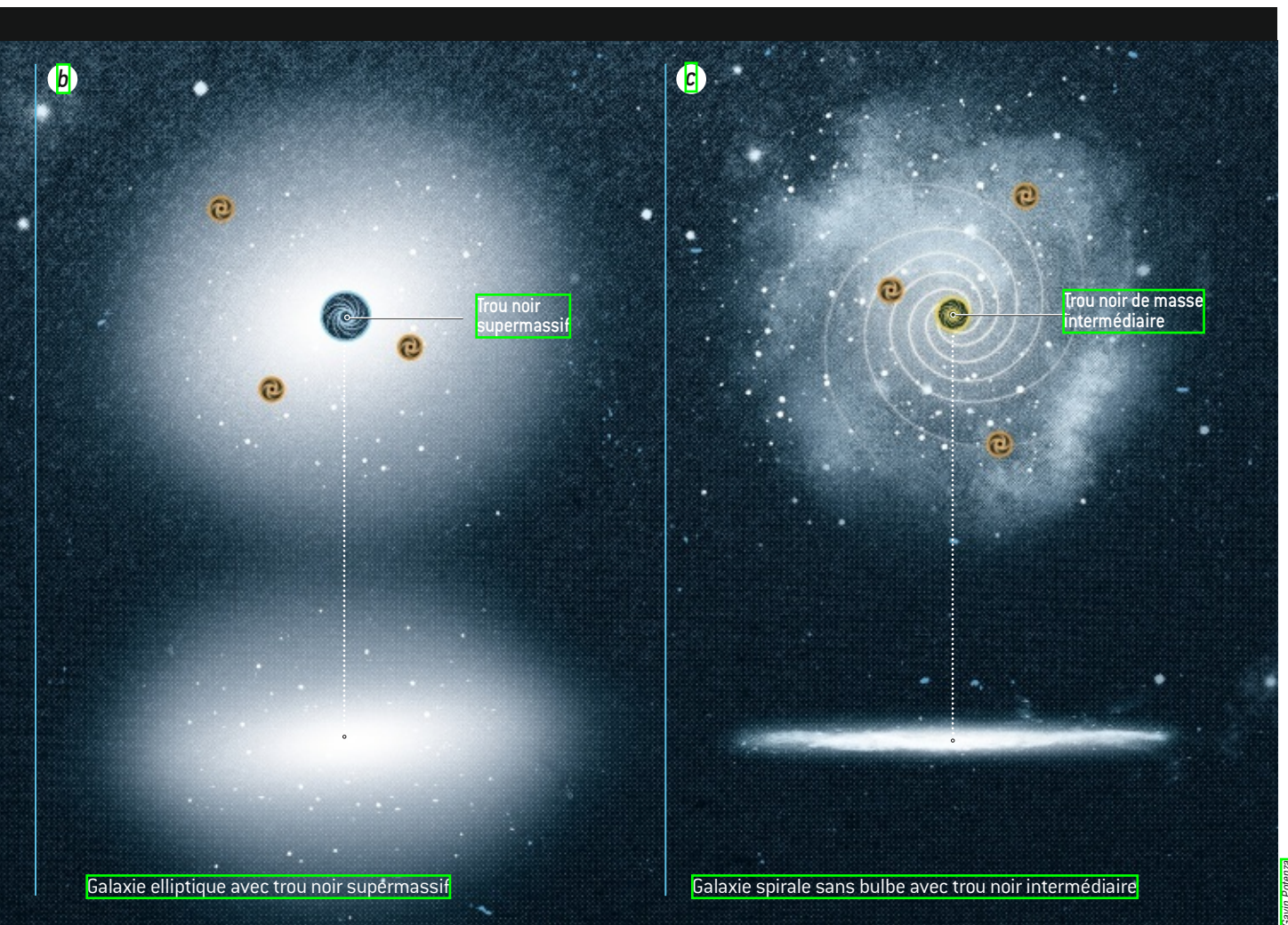
L'estimation de la masse du trou noir de NGC 4395 est particulièrement malaisée. Les mesures de masse les plus directes en astronomie passent par l'observation du mouvement orbital. La période d'une planète et la taille de son orbite autour du Soleil permettent par exemple de déduire la masse de ce dernier. De même, les orbites des étoiles dans une galaxie peuvent révéler la masse du trou noir central, s'il est suffisamment gros pour que l'on puisse distinguer les effets de sa gravité du mouvement d'ensemble des étoiles. Malheureusement, le trou noir de NGC 4395 est trop petit pour cela.

On doit donc exploiter des indices moins directs. Par exemple, le rayonnement X émis par les trous noirs actifs change d'intensité avec le temps, et plus le trou noir est gros, plus ces variations sont lentes. En 2003, David Shih et ses collègues, à l'Université de Cambridge, ont trouvé que l'intensité du rayonnement X émanant de NGC 4395 varie

si vite que la masse du trou noir doit être comprise entre 10 000 et 100 000 masses solaires. Au même moment, L. Ho est arrivé à peu près à la même fourchette de masse en s'appuyant sur d'autres indices.

Des masses difficiles à estimer

Bradley Peterson, de l'Université de l'Ohio, et ses collègues ont effectué en 2005 une mesure un peu plus directe. Ils ont utilisé, à l'aide du télescope spatial *Hubble*, une technique dite de cartographie par réverbération. La réverbération des bouffées de lumière émises par le trou noir sur les nuages de gaz interstellaires proches permet de déterminer leur position et leur vitesse, et donc leurs orbites autour du trou noir central, donnant ainsi accès à la masse de celui-ci. B. Peterson et ses collègues ont ainsi estimé que le trou noir de NGC 4395 représente environ



© 2011 L'Édition

360 000 masses solaires. Mais même avec cette technique, une incertitude d'un facteur trois subsiste, en raison des hypothèses faites pour le calcul.

La galaxie sans bulbe NGC 4395 semble ainsi abriter exactement le type de trou noir de masse intermédiaire que nous cherchions. Cependant, des 500 galaxies examinées par L. Ho, c'était la seule galaxie sans bulbe à présenter des signes clairs de la présence d'un trou noir actif. La deuxième a été trouvée en 2002.

Aaron Barth, alors à l'Institut de technologie de Californie, a utilisé le télescope *Keck II* de Hawaï pour obtenir le spectre d'une curieuse petite galaxie peu étudiée, POX 52. Comme NGC 4395, cette galaxie présentait des signes encourageants, sans pour autant avoir le profil type pour abriter un trou noir supermassif (c'est une galaxie d'un type rare, dit sphéroïdal, distinct des galaxies spirales à bulbe et elliptiques). Or le spec-

tre de POX 52 obtenu ressemble de façon frappante à celui de NGC 4395, et présente les mêmes caractéristiques qui trahissent la présence d'un trou noir !

POX 52 se trouve à 300 millions d'années-lumière, 20 fois plus loin que NGC 4395, si bien que l'estimation de la masse de son trou noir est encore moins facile. Cependant, divers indices convergent vers un trou noir d'environ 100 000 masses solaires. Les trous noirs intermédiaires dans les galaxies sans bulbe définissent dès lors une classe... contenant deux éléments !

Bien sûr, nous avons besoin de davantage de spécimens de trous noirs intermédiaires pour répondre à toute une série de questions. Quelle est leur fréquence ? Toutes les galaxies sans bulbe en contiennent-elles un, ou bien les galaxies de ce type sont-elles pour la plupart dépourvues de trou noir ? Trouve-t-on ailleurs des trous noirs intermédiaires ? Existe-t-il des spécimens encore plus petits ? Ce n'est qu'en

répondant à ces questions que nous comprendrons comment les germes des trous noirs supermassifs se sont formés, et quel rôle ils ont joué dans l'Univers jeune.

Malheureusement, les méthodes classiques sont peu propices à la détection de trous noirs intermédiaires actifs. Plus un trou noir est gros, plus il peut se nourrir et plus il brille. Les petits trous noirs sont peu lumineux et donc plus difficiles à déceler. Mais il y a pire. Les galaxies elliptiques, où les gros trous noirs ont tendance à se trouver, sont un environnement favorable à la détection : elles ne renferment pas beaucoup de gaz et ne produisent pas de nouvelles étoiles, ce qui offre une vue dégagée du centre galactique. À l'inverse, les galaxies spirales, où l'on soupçonne les trous noirs intermédiaires de se cacher, forment plus d'étoiles. Or le rayonnement énergétique des jeunes étoiles, combiné au gaz et à la poussière opaques, peuvent dissimuler le signal d'un trou noir actif.

Les astronomes ont repéré jusqu'à présent une centaine de trous noirs intermédiaires de moins de deux millions de masses solaires.

Pour surmonter ces obstacles, L. Ho et moi avons exploité à partir de 2004 un précieux catalogue astronomique nommé SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). Depuis 2000, ce recensement a observé plus d'un quart du ciel et obtenu le spectre de millions d'étoiles et de galaxies individuelles.

Nous avons passé au peigne fin 200 000 spectres de galaxies du relevé SDSS, et avons repéré 19 nouvelles candidates semblables à NGC 4395, c'est-à-dire des petites galaxies abritant des trous noirs actifs de moins d'un million de masses solaires. Des recherches similaires effectuées ces dernières années sur des données plus récentes du catalogue SDSS ont porté le total à une quarantaine de trous noirs de moins d'un million de masses solaires, et plus d'une centaine juste au-dessus du million de masses solaires.

La méthode utilisée pour estimer ces masses est assez indirecte. Les spectres

lumineux du SDSS nous livrent la vitesse du gaz chaud en orbite autour du trou noir central. Pour calculer directement la masse du trou noir, il manque la taille de l'orbite. Néanmoins, en extrapolant aux petits trous noirs la relation entre la vitesse du gaz et la masse du trou noir (plus il est petit, plus le gaz est lent) observée sur les trous noirs actifs d'un million à un milliard de masses solaires, nous pouvons repérer nos candidats trous noirs intermédiaires dans les données du SDSS.

Éplucher le catalogue de spectres

Ces recherches ont confirmé ce que NGC 4395 et POX 52 suggéraient: il existe une vaste population de trous noirs de masse intermédiaire résidant dans les galaxies sans bulbe. Pour autant, ces trous noirs semblent très rares. Parmi les galaxies assez brillantes pour être étudiées dans le SDSS, seule une sur un millier présente des signes de la présence d'un trou noir de masse intermédiaire actif.

Cependant, les recherches menées à partir du catalogue SDSS pourraient passer à côté de nombreux trous noirs. En effet, elles exploitent uniquement le domaine visible du spectre lumineux, si bien que la poussière pourrait cacher de nombreux trous noirs à notre vue. Pour contourner ce problème, on peut observer en rayons X, en infrarouge moyen et en ondes radio, rayonnements qui traversent la poussière.

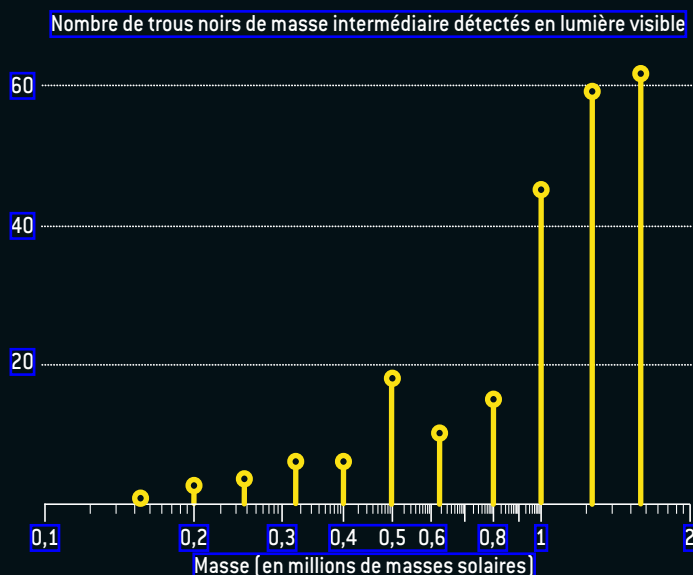
Shobita Satyapal, de l'Université George Mason, en Virginie, et ses collègues ont cherché en infrarouge moyen des trous noirs actifs dans les galaxies sans bulbe. Les rayons X émis par le gaz qui plonge dans le trou noir ionisent le gaz environnant, créant des raies spectrales caractéristiques, telle celle du néon fortement ionisé, dans l'infrarouge. Peu de galaxies se prêtent à ce genre de recherche, et l'équipe de S. Satyapal n'a découvert que quelques nouveaux trous noirs intermédiaires actifs. Les astronomes ont également vu, en rayons X et ondes radio, des signes de trous noirs intermédiaires potentiels ainsi que des petits trous noirs supermassifs. Des observations complémentaires sont en cours pour confirmer ces candidats.

Ces résultats indiquent que de nombreux trous noirs moyens cachés dans la poussière de leur galaxie échappent à la détection dans le domaine optique. Mais même en corrigeant ce biais, les trous noirs

L'EFFONDREMENT DIRECT PRIVILÉGIÉ

L'analyse du spectre en lumière visible de 500 000 galaxies a permis de découvrir plus d'une centaine de trous noirs ayant une masse estimée inférieure à deux millions de masses solaires (*ci-dessous*). D'autres études, s'appuyant sur l'infrarouge moyen, les rayons X et les ondes radio, ont mis en évidence des candidats trous noirs supplémentaires.

Il semble que la plupart des galaxies sans bulbe n'abritent pas de trou noir intermédiaire en leur cœur, mais que s'il y en a un, il est assez massif. Ces observations sont compatibles avec le scénario de formation des germes de trous noirs supermassifs par effondrement direct de nuage de gaz. Si ces germes résultaient d'effondrements stellaires, presque toutes ces galaxies devraient renfermer un trou noir d'au moins 10 000 masses solaires.



LA NEW SCIENCE ET L'UNIVERS DES TROUS NOIRS. CRÉDIT: JOURNAL OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, VOL. 50, NO. 1, NOVEMBRE 2007

intermédiaires semblent rares. Seuls 5 à 25 pour cent des galaxies sans bulbe abriteraient un trou noir de poids moyen suffisamment gros pour être détecté.

Les observations de trous noirs intermédiaires pourraient contribuer à expliquer la corrélation entre les gros trous noirs et les gros bulbes. Comme je l'ai évoqué précédemment, les trous noirs supermassifs dans les galaxies à gros bulbe représentent souvent un millième de la masse du bulbe. La croissance d'un trou noir supermassif semble intimement liée à celle du bulbe qui l'enserme. Si cette corrélation est valable dès la formation du bulbe, alors il ne devrait pas y avoir de corrélation entre les propriétés des galaxies sans bulbe et celles de leurs trous noirs intermédiaires.

Grandir au gré des collisions

L'une des principales théories proposées pour expliquer l'origine de cette étroite corrélation est la suivante : les galaxies elliptiques et les bulbes massifs se forment lorsque des galaxies spirales entrent en collision. Au cours de la fusion, les interactions gravitationnelles sèment la pagaille dans les disques, envoyant les étoiles dans tous les sens au sein d'une région sphérique (la future galaxie elliptique ou bulbe). Les nuages de gaz entrent en collision pendant la fusion et migrent vers le centre du bulbe sous l'effet de la gravité, déclenchant un sursaut de formation stellaire, ce qui augmente la masse stellaire du bulbe.

Dans le même temps, les trous noirs centraux de chaque galaxie fusionnent et absorbent une partie du gaz frais au centre de la galaxie. Bulbes et trous noirs supermassifs peuvent ainsi croître et évoluer de concert au fil des fusions de galaxies. Lorsque le trou noir atteint environ un millième de la masse du bulbe, son « souffle » l'emporte et repousse le gaz hors du centre galactique, mettant fin à la croissance.

Les trous noirs intermédiaires dans les galaxies sans bulbe, comme NGC 4395, n'auraient jamais profité des festins offerts par les fusions. Au lieu de cela, ces germes restants n'auraient grossi qu'au hasard d'encas de gaz croisés au centre de la galaxie, sans lien avec les fusions qui dirigent l'évolution d'ensemble de celle-ci. Certaines galaxies sans bulbe pourraient ne pas contenir de trou noir du tout. C'est le cas de la galaxie spirale « pure » M33 – très sem-



LA GALAXIE NGC 4395, une galaxie spirale sans bulbe, a été la première où l'on a découvert un trou noir central de masse intermédiaire.

blable par son apparence physique à NGC 4395 –, qui ne contient clairement aucun trou noir de plus de 1 500 masses solaires. Les indices s'accumulent en faveur de ce tableau liant la croissance des trous noirs à la formation du bulbe, mais de nombreux détails restent à élucider.

Quant à la question de la formation des germes de trous noirs, la rareté des trous noirs intermédiaires renforce la théorie de l'effondrement direct de nuages de gaz dans l'Univers précoce. Si l'effondrement stellaire rendait compte des premiers germes de trous noirs, presque toutes les galaxies sans bulbe devraient abriter des trous noirs d'au moins 10 000 masses solaires. Il semble cependant que les plus petites d'entre elles ne contiennent pas de trou noir.

D'autres indices sont aussi en faveur du scénario d'effondrement direct. En particulier, la faible corrélation des masses des trous noirs intermédiaires avec celles de leurs galaxies hôtes correspond mieux aux prédictions de ce scénario. Et il est bien plus facile d'aboutir à un trou noir d'un milliard de masses solaires en quelques millions d'années si les germes sont déjà très massifs au départ.

Bien sûr, de nouvelles données pourraient conduire à revoir cette conclusion. Par exemple, quand on pourra étudier des galaxies moins lumineuses que celles du relevé SDSS, la proportion de galaxies dotées de trous noirs intermédiaires pour-

rait augmenter ou baisser. Il est également possible que certaines galaxies abritent des trous noirs intermédiaires en dehors du centre galactique.

Beaucoup d'inconnues

Pour l'heure, de nombreuses questions concernant les trous noirs intermédiaires restent ouvertes. Sont-ils plus répandus dans certains types de petites galaxies ? De telles corrélations suggéreraient de nouveaux mécanismes d'interaction des trous noirs et de leurs galaxies hôtes avant les épisodes de fusion.

La plupart des galaxies sans bulbe sont-elles totalement dépourvues de trous noirs intermédiaires, ou ces derniers sont-ils simplement trop petits – de l'ordre d'un millier de masses solaires – pour être détectés pour l'instant ? De tels trous noirs seraient très certainement issus de l'effondrement d'étoiles. Ou encore, peut-être toutes les galaxies sans bulbe hébergent-elles un imposant trou noir intermédiaire – de 10 000 à 100 000 masses solaires –, mais qui serait la plupart du temps inactif, faute de gaz à engloutir ? Nous ne pourrions alors plus conclure que les trous noirs intermédiaires sont rares. Selon les réponses, les théories de formation des galaxies et des trous noirs supermassifs prendront des orientations radicalement différentes. ■



1. LES TOXINES BOTULIQUES

sont produites par *Clostridium botulinum*, des bactéries en forme de bâtonnets (tels ceux représentés sur cette vue d'artiste). Dans un environnement stressant, la bactérie forme une structure résistante – la spore – qui ne se multiplie plus. La spore germe à nouveau quand l'environnement devient favorable, colonise le lieu (un aliment ou directement la flore intestinale) et excrète les toxines.

César Mattei et Frédéric Meunier

L'étude des mécanismes d'action des toxines botuliques, responsables d'une maladie grave, le botulisme, a permis la mise au point de traitements de certaines maladies neuromusculaires.

Toxines poison et

Durant l'été 2011, plusieurs personnes ont été victimes d'une intoxication alimentaire après avoir consommé des tapenades artisanales achetées dans le Sud de la France. Ces produits en conserve étaient contaminés par les plus puissantes toxines du règne vivant : les toxines botuliques. Ces toxines sont synthétisées par une bactérie anaérobie, *Clostridium botulinum*. L'ingestion de cette bactérie présente dans certains aliments peut entraîner une infection alimentaire complexe, le botulisme, qui doit son nom au latin *botulus* (boudin) – l'une des premières descriptions de la maladie, à la fin du XVIII^e siècle en Allemagne, ayant identifié des saucisses comme agent contaminant. Les documents historiques sur les intoxications alimentaires sont rares avant le XVIII^e siècle, mais on sait qu'au X^e siècle, l'empereur byzantin Léon VI interdit

la fabrication de boudin, sans doute suite à une intoxication de type botulisme.

Des toxines du système nerveux

D'un côté responsables d'intoxications alimentaires graves et considérées comme une arme biologique potentielle, ces molécules naturelles sont également utilisées en médecine, et ce, dans un nombre croissant d'indications thérapeutiques. La description des mécanismes d'action de ces toxines à l'échelle cellulaire a beaucoup progressé et devrait permettre de développer encore leur utilisation thérapeutique tout en limitant leurs effets secondaires. C'est cette dualité des toxines botuliques que nous examinerons ici, de la maladie qui les fit connaître aux traitements qu'elles fournissent. Nous verrons comment

maladie et traitements reposent sur un même principe : la paralysie flasque des muscles. Mais, tout d'abord, qu'est-ce qu'une toxine ?

Du grec *toxicon* (poison recouvrant les flèches), une toxine est une biomolécule létale à faible concentration, qui confère un pouvoir paralysant à l'organisme qui la sécrète. On en trouve partout. Dans le règne animal, les toxines sont les constituants majeurs des venins : scorpions, serpents, araignées, cônes, insectes, amphibiens, et bien d'autres, utilisent les toxines dans des stratégies de prédation ou de défense contre un adversaire. Les espèces animales ont évolué en fonction de leur environnement, parfois en synthétisant des toxines, dans une sorte de course à l'armement biologique entre espèces concurrentes. Les végétaux sécrètent aussi des toxines, qu'ils utilisent souvent pour repous-



SCIENCE PHOTO LIBRARY

L'ESSENTIEL

- ✓ Produites par une bactérie présente dans le sol, les toxines botuliques contaminent l'homme *via* des aliments en conserve mal ou pas stérilisés.
- ✓ Le botulisme se traduit par une paralysie flasque des muscles, qui peut entraîner la mort.
- ✓ Les toxines bloquent les signaux transmis par le système nerveux aux muscles, les empêchant de se contracter.
- ✓ Depuis quelques années, plusieurs cibles moléculaires des toxines dans les neurones ont été identifiées.
- ✓ La compréhension du mécanisme d'action des toxines permet de les utiliser pour traiter certaines pathologies liées à une hyperstimulation des muscles.

botuliques : médicament

ser des parasites ou des herbivores. Certains champignons et algues sont également des producteurs de toxines. Enfin, comme *Clostridium botulinum*, de très nombreux types de bactéries libèrent des toxines qui faciliteraient leur expansion, et sont en conséquence des vecteurs de maladies (tétanos, diphtérie, anthrax, choléra...).

Le système nerveux central et périphérique est l'une des cibles principales des toxines, nommées alors neurotoxines. Pour des animaux venimeux, l'avantage d'une neurotoxine réside dans sa capacité à neutraliser une proie, en la paralysant. Dans des contextes écologiques très divers, l'usage d'un venin permet par exemple à un animal lent d'immobiliser rapidement une proie. La paralysie revêt deux formes antagonistes : une paralysie flasque – où l'adversaire perd son tonus musculaire – et une paralysie spastique,

exagération de la contraction musculaire qui « fige » l'animal ciblé.

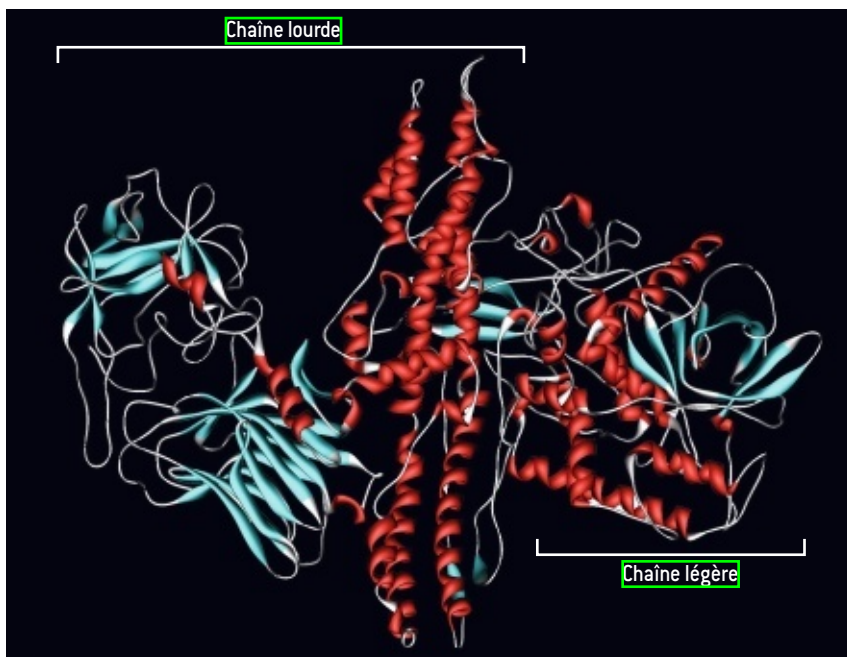
Ces effets paralysants sont dus à l'action d'une ou plusieurs toxines qui se fixent sur un récepteur membranaire impliqué dans la contraction musculaire. La compréhension du mode d'action d'une toxine permet à la médecine d'envisager un traitement adéquat dans des cas d'envenimations. En recherche, les neurotoxines sont aussi utilisées depuis plus d'un siècle comme outils pharmacologiques pour étudier les mécanismes moléculaires et physiologiques dans le système nerveux. Depuis plus longtemps encore, l'homme exploite le pouvoir de toxines dont il a observé les effets dans la nature, que ce soit pour la chasse (le curare) ou en médecine traditionnelle (la digitale).

Les toxines botuliques font partie des neurotoxines qui agissent sur le système

nerveux périphérique. C'est en étudiant les symptômes du botulisme et en recherchant les cibles de ces toxines dans le système nerveux que l'on a mis en évidence leurs mécanismes d'action.

Les symptômes : une paralysie flasque

Le botulisme revêt plusieurs formes chez l'homme. La plus répandue est le botulisme infantile, auquel on impute certains cas de mort spontanée du nouveau-né. Le passage, pour un nourrisson, du lait maternel à une nourriture exogène l'expose à des contaminants alimentaires que sa propre flore bactérienne, son système digestif et son système immunitaire, immatures, ne peuvent encore systématiquement éliminer. La présence abondante de *Clostridium botulinum* à la



2. LA TOXINE BOTULIQUE A comporte deux chaînes principales : une chaîne lourde qui lui permet d'entrer dans les neurones de l'organisme infecté, et une chaîne légère qui porte son activité toxique.

surface d'aliments aussi courants que le miel représente un danger potentiellement mortel pour un bébé. C'est pourquoi l'utilisation du miel est déconseillée chez le nourrisson. La consommation accidentelle de la bactérie entraîne chez l'enfant une paralysie flasque. La mort survient par arrêt cardio-respiratoire.

Chez l'adulte, le botulisme est observé après ingestion d'aliments contaminés et mal stérilisés – c'est le cas de certaines conserves artisanales ou familiales. Une autre forme infectieuse de botulisme, qui se transmet par une plaie, a été observée chez des toxicomanes qui avaient échangé des seringues. Enfin, des cas – rares – de botulisme « de laboratoire » sont connus, chez les chercheurs qui manipulent la bactérie ou ses toxines. La contamination inter-humaine n'existe pas.

En fait, les cas de botulisme répertoriés sont rares : près de 1 000 par an dans le monde. En France, par exemple, entre 2007 et 2009, 45 personnes ont été atteintes, dont 4 bébés. Néanmoins, la maladie persiste et se manifeste souvent sous des formes graves qui justifient le maintien de la surveillance.

Chez une personne intoxiquée, les symptômes apparaissent 12 heures à 3 jours après l'exposition aux toxines. Les signes sont essentiellement d'ordre neurologique et musculaire : il s'agit d'une paralysie flasque, progressive et symétri-

Une toxine antidouleur

✓ Plusieurs neurotoxines sont exploitées en clinique. Ainsi, l'oméga-conotoxine MVIIA, sécrétée par le cône *Conus magus* (ci-dessous), est utilisée contre la douleur chronique, car elle inhibe des canaux calcium spécifiques des neurones sensoriels de la douleur. Elle est utilisée chez des malades atteints de cancer ou du sida avec une activité environ 10 000 fois supérieure à celle de la morphine.



que. La paralysie des muscles squelettiques est caractéristique du botulisme. Dans les cas graves, les muscles lisses du système respiratoire sont atteints, ce qui peut conduire à une paralysie respiratoire entraînant le décès si le sujet n'est pas pris en charge très rapidement. La récupération fonctionnelle complète des muscles paralysés survient généralement quelques mois après un épisode botulique. Des séquelles sont néanmoins possibles, en particulier une difficulté respiratoire ou une fatigabilité musculaire.

Un vaccin utilisé avec parcimonie

Avant d'identifier la toxine, on soulage la détresse respiratoire du malade en le plaçant sous ventilation artificielle. Quand le sérotype de la toxine est connu, un antiserum dirigé contre la toxine incriminée est administré.

D'origine animale, cette antitoxine constitue une protection efficace contre la toxine botulique de type A, à condition que le botulisme soit diagnostiqué suffisamment tôt. Toutefois, l'apparition de réactions allergiques aiguës a stimulé la recherche de nouveaux vaccins d'origine humaine. Ces vaccins ne sont administrés qu'aux personnels de laboratoire et aux militaires exposés à un risque de botulisme, car ils présentent un inconvénient majeur : ils excluent, pour les personnes vaccinées, l'utilisation de ces toxines comme traitements contre certaines pathologies neuromusculaires – une spécialité médicale, nous allons le voir, en expansion.

Contrairement à d'autres maladies bactériennes, le botulisme ne doit pas être traité avec des antibiotiques, car, en lysant les bactéries *Clostridium botulinum* présentes dans le système digestif, les antibiotiques augmenteraient la libération de toxines et leur concentration dans le sang.

Même si d'autres souches de bactéries *Clostridium* sécrètent des toxines botuliques, *Clostridium botulinum* en est le producteur principal. Présente dans les sols, la bactérie est particulièrement résistante aux diverses contraintes environnementales, notamment la chaleur, grâce à un mécanisme de sporulation. Elle entre dans un état de dormance en formant une structure résistante – une spore – qui redonnera une bactérie lorsque les conditions redeviendront favorables. Il existe sept sérotypes de toxines botuliques, dési-

gnés par les lettres A à G. Les intoxications alimentaires humaines sont très souvent associées aux sérotypes A, B ou E (dans le cas des tapenades contaminées, il s'agissait de la toxine botulique A).

Les toxines botuliques sont de grosses protéines dotées d'une activité protéolytique, c'est-à-dire capables de cliver – découper – certains types de protéines cibles. La toxine est d'abord produite par la bactérie sous la forme d'une protéine unique. Ensuite s'assemblent deux chaînes reliées par un pont disulfure : une chaîne lourde lui permet d'entrer dans les cellules neuronales et une chaîne légère porte l'activité toxique (voir la figure 2). Quand elle est ingérée, la toxine est au sein d'un supercomplexe protéique : elle est entourée de plusieurs autres sous-unités non toxiques qui la protègent de l'environnement destructeur du tube digestif.

Lorsqu'une personne ingère des toxines botuliques dans des aliments contaminés ou des spores de la bactérie *Clostridium botulinum*, les toxines entrent dans l'appareil digestif. Elles traversent la paroi du tube digestif par transcytose : au sein de petites vésicules, elles pénètrent dans les cellules

gastro-intestinales qui tapissent le tube digestif et ressortent de l'autre côté de la paroi. Elles atteignent ainsi la circulation sanguine ou lymphatique, où elles sont transportées jusqu'à leur cible : les jonctions neuromusculaires, c'est-à-dire ce qui relie le système nerveux périphérique et les fibres musculaires squelettiques.

Leur cible : la jonction neuromusculaire

En temps normal, la contraction musculaire – qui commande l'ensemble des mouvements du corps humain – s'effectue selon la séquence d'événements suivants. En premier lieu, un neurone moteur, issu de la moelle épinière, conduit l'influx nerveux – ou potentiel d'action – le long de la fibre nerveuse. Parvenu à l'extrémité terminale du neurone, ce potentiel d'action déclenche la libération, dans l'espace séparant le neurone de la fibre musculaire, d'acétylcholine, un neurotransmetteur. L'acétylcholine se fixe sur son récepteur porté par la membrane de la cellule musculaire. Fixée à son récepteur, l'acétylcholine déclenche un potentiel d'action musculaire et une cas-

cade de réactions qui aboutit à la contraction des fibres musculaires, et donc du muscle tout entier (voir l'encadré page 46).

Les toxines botuliques empêchent la libération d'acétylcholine. C'est ce qu'ont montré, dans les années 1980, plusieurs équipes dont celle de Jordi Molgó, du Laboratoire de neurobiologie cellulaire et moléculaire (CNRS), à Gif-sur-Yvette, en collaboration avec Stephan Thesleff (Université de Lund, en Suède). Elles « intoxiquent » le neurone moteur en quatre étapes : elles se lient d'abord à une molécule – un récepteur – sur la membrane des terminaisons neuronales. Puis elles entrent dans le neurone par une stratégie de cheval de Troie : elles sont internalisées au sein de vésicules dites synaptiques au cours de l'endocytose, processus par lequel le neurone produit de nouvelles vésicules par invagination de sa membrane. À l'intérieur du neurone, elles se libèrent de leurs vésicules et, dernière étape, lysent leurs cibles, des protéines impliquées dans la libération des neurotransmetteurs. Or si l'acétylcholine n'est pas libérée, l'influx nerveux n'est pas transmis et le muscle est paralysé ! Ce mécanisme est comparable à celui

Un agent du risque biologique

Extrêmement toxiques, relativement faciles à produire, les toxines botuliques sont considérées comme des agents du risque biologique parmi les plus dangereux. Les agents du risque biologique sont des entités vivantes, ou issues du vivant, susceptibles d'être utilisées à des fins militaires ou par une entité terroriste contre une population civile. L'objectif est d'infliger à une population humaine ou animale, ou à des denrées agricoles, une maladie entraînant des pertes et des conséquences importantes sur le plan économique et psychologique. Les principaux agents du risque biologique sont des virus (variole, fièvre hémorragique), des bactéries (peste, charbon, tularémie) et des toxines (saxitoxine, ricine, toxines botuliques).

Quand on s'intéresse aux critères qui permettent de classer ces agents comme militarisables, ce n'est pas la bactérie productrice (*Clostridium botulinum*), mais les neurotoxines qu'elle excrète qui représentent l'arme biologique. Elles sont do-

tées d'un très faible seuil infectieux ; elles ne sont pas contagieuses, donc épargnent l'utilisateur ; elles font rarement l'objet d'une vaccination, et leurs symptômes apparaissent assez vite (de quelques heures à quelques jours). C'est ce qui a conduit, fin 2001 (suite à l'envoi de lettres piégées à l'anthrax), les Centres américains de contrôle des maladies (CDC) à classer les toxines botuliques dans la catégorie A, le degré le plus élevé du risque biologique. La dose létale 50 pour les toxines botuliques, c'est-à-dire la concentration nécessaire pour tuer la moitié d'un échantillon, est estimée entre un et trois nanogrammes par kilogramme en injection intraveineuse.

Les scénarios d'usage militaire des toxines botuliques prévoient une contamination par voie orale, c'est-à-dire un empoisonnement de réserves d'eau potable ou de denrées alimentaires, au moment de leur stockage ou dans le cadre de la restauration collective. Ces toxines botuliques pourraient aussi être répan-

dues sous forme d'un aérosol et inhalées par une cible humaine.

En 2005, une étude américaine, dont la publication a entraîné un débat sur l'opportunité de rendre accessibles des données « sensibles », a présenté la modélisation des effets sur l'homme de la contamination d'une chaîne de distribution de lait de vache par la toxine botulique.

De fait, les toxines botuliques ont déjà été utilisées à des fins militaires ou terroristes. Ainsi, au cours du XX^e siècle, de nombreux États, dont la France, ont développé des programmes militaires biologiques à des fins offensives, dont la plupart incluaient les toxines botuliques. Leur militarisation par l'Irak a été révélée au sortir de la première guerre du Golfe, en 1991, et le Japon a empoisonné, pendant la Seconde Guerre mondiale, des prisonniers chinois de la sinistre Unité 731, en Mandchourie, au cours de l'occupation de la Chine.

Pour l'heure, on ne compte qu'un nombre très faible d'attentats à la toxine botulique, et ils n'ont pas



Un militaire français en tenue NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique), à Djibouti, en 2005.

fait de victime : la secte japonaise Aum Shinrikyo a tenté à plusieurs reprises de répandre à Tokyo des toxines botuliques, de même que des spores d'anthrax, sans succès. En France, la détention, le stockage, le transport, l'exportation d'agents du risque biologique – micro-organismes pathogènes et toxines – font l'objet d'une réglementation stricte, permettant d'établir une traçabilité de ces différents agents. Les maladies qu'ils entraînent sont à déclaration obligatoire.

LES AUTEURS



César MATTEI est maître de conférences au sein du Laboratoire Récepteurs et canaux ioniques membranaires, à l'Université d'Angers.

Frédéric A. MEUNIER est directeur de recherche à l'Institut du cerveau du Queensland, à l'Université du Queensland en Australie.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 8 mars 2012, César Mattei reviendra sur le double visage de la toxine botulique dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur **France Culture** de 14h à 15h.
www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. A. Foster, Engineered toxins : new therapeutics, *Toxicon*, vol. 54, pp. 587-592, 2009.

B. Poulain *et al.*, How do the botulinum neurotoxins block neurotransmitter release : from botulism to the molecular mechanism of action, *The Botulinum J.*, vol. 1, pp. 14-87, 2008.

R. Jahn, A neuronal receptor for botulinum toxin, *Science*, vol. 312, pp. 540-541, 2006.

P. G. Foran *et al.*, Getting muscles moving again after botulinum toxin : novel therapeutic challenges, *Trends Mol. Med.*, vol. 9, pp. 291-299, 2003.

S. S. Aron *et al.*, Botulinum toxin as a biological weapon. Medical and public health management, *JAMA*, vol. 285, pp. 1059-1070, 2001.

E. J. Schantz et E. A. Johnson, Properties and use of botulinum toxin and other microbial neurotoxins in medicine, *Microbiol. Rev.*, vol. 56, pp. 80-99, 1992.

de la toxine tétanique, responsable du té-tanos, à une exception notable près : la toxine tétanique n'agit pas directement sur le motoneurone, mais en amont de celui-ci, en bloquant la sécrétion d'un neurotransmetteur au niveau de la moelle épinière.

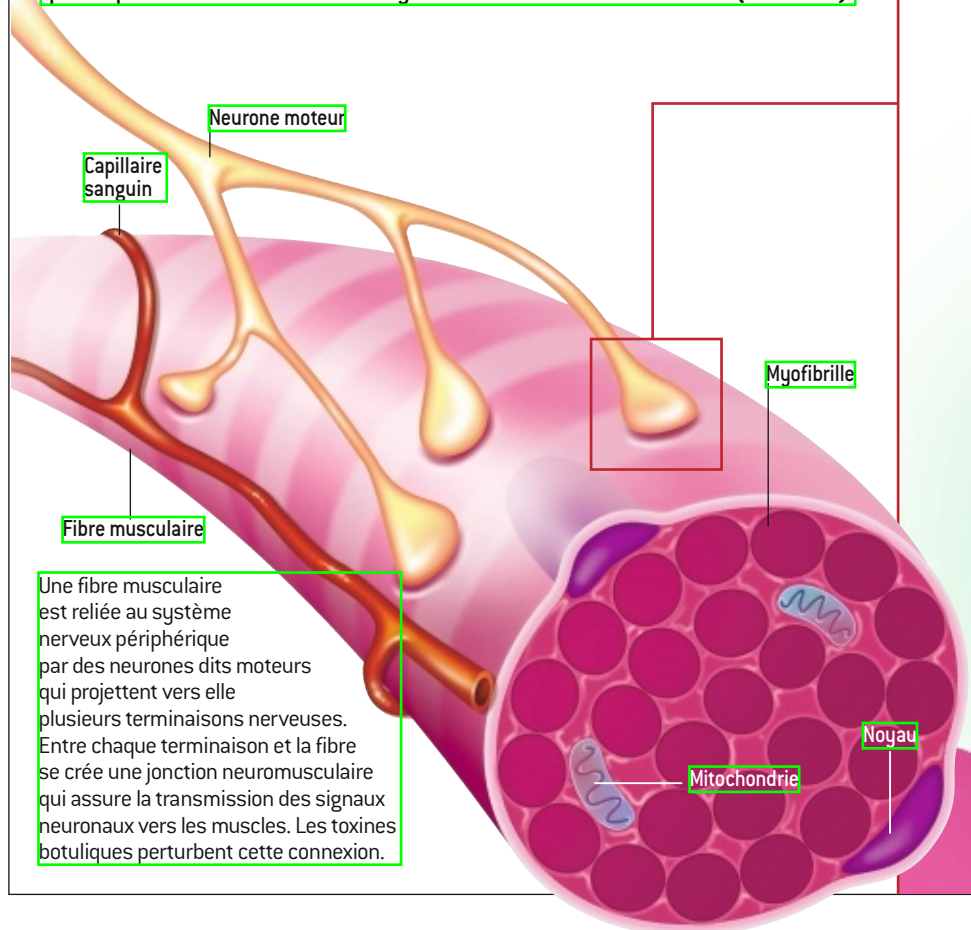
L'identification des différentes cibles des toxines n'a commencé qu'au début des années 1990. Les récepteurs des toxines botuliques, en particulier, ont été identifiés récemment, notamment par l'équipe d'Edwin Chapman, de l'Université du Wisconsin, aux États-Unis. Les toxines se lient en réalité à deux types de récepteurs. Les premiers, de faible affinité, sont des glycolipides membranaires nommés gangliosides, spécifiques des terminaisons nerveuses. Le second, de moyenne affinité, est une protéine membranaire : la protéine SV2 (*Synaptic Vesicle Protein*) pour

les toxines botuliques A et E, et la synaptotagmine pour la toxine botulique B (en temps normal, la synaptotagmine est impliquée dans la libération de l'acétylcholine ; le rôle de la protéine SV2 est à préciser). Fixées à leurs récepteurs par leur chaîne lourde, les toxines sont internalisées dans une vésicule synaptique.

Signaux interrompus vers les muscles

La chaîne légère toxique sort alors de la vésicule synaptique grâce à un changement de conformation de la chaîne lourde qui intervient lors de la maturation de la vésicule synaptique. La vésicule subit une acidification de son contenu (par influx de protons dans la vésicule à travers une pompe à protons, une protéine

Les toxines botuliques créent une paralysie flasque des muscles en bloquant la libération d'un neurotransmetteur, l'acétylcholine, du système nerveux périphérique vers les fibres des muscles squelettiques (*ci-dessous*). Véhiculées par la circulation sanguine et lymphatique de la personne infectée, elles atteignent les jonctions neuromusculaires. Elles agissent alors en pénétrant dans la terminaison neuronale de la jonction et en inhibant certaines protéines qui participent à la libération de l'acétylcholine vers la fibre musculaire (*ci-contre*).



membranaire qui laisse entrer les protons). Cette acidification change la conformation de la chaîne lourde, qui forme alors un pore dans la membrane de la vésicule, à travers lequel la chaîne légère transite pour gagner le milieu intracellulaire, le cytoplasme.

Les conditions réductrices qui règnent dans le cytoplasme (peu d'oxygène) permettent à la chaîne légère de se détacher de la chaîne lourde. Au début des années 1990, l'équipe de Cesare Montecucco, de l'Université de Padoue, en Italie, puis d'autres, ont montré que la chaîne légère clive alors des protéines dites SNARE, qui assurent l'exocytose des vésicules synaptiques, c'est-à-dire la libération, hors du neurone, de leur contenu – l'acétylcholine – par fusion des vésicules avec la membrane neuronale.

En temps normal, ancrées soit dans les vésicules synaptiques, soit dans la membrane neuronale, les protéines SNARE s'assemblent en un complexe qui rapproche les membranes vésiculaire et neuronale, ce qui déclenche leur fusion. C'est cette étape que les toxines bloquent. Chaque sérotype de toxine botulique clive une (parfois deux) de ces protéines SNARE. Les toxines botuliques A, C et E clivent une (parfois deux) de ces protéines SNARE. Les toxines botuliques A, C et E clivent SNAP-25, une protéine de la membrane neuronale, alors que les toxines botuliques B, D, F et G coupent la synaptobrevine, une protéine de la vésicule synaptique. Enfin, la toxine botulique C coupe aussi la syntaxine, une protéine de la membrane neuronale. Dans ces trois cas, le résultat est identique : les vésicules synaptiques ne peuvent fusionner avec la membrane neuronale. L'acétylcholine

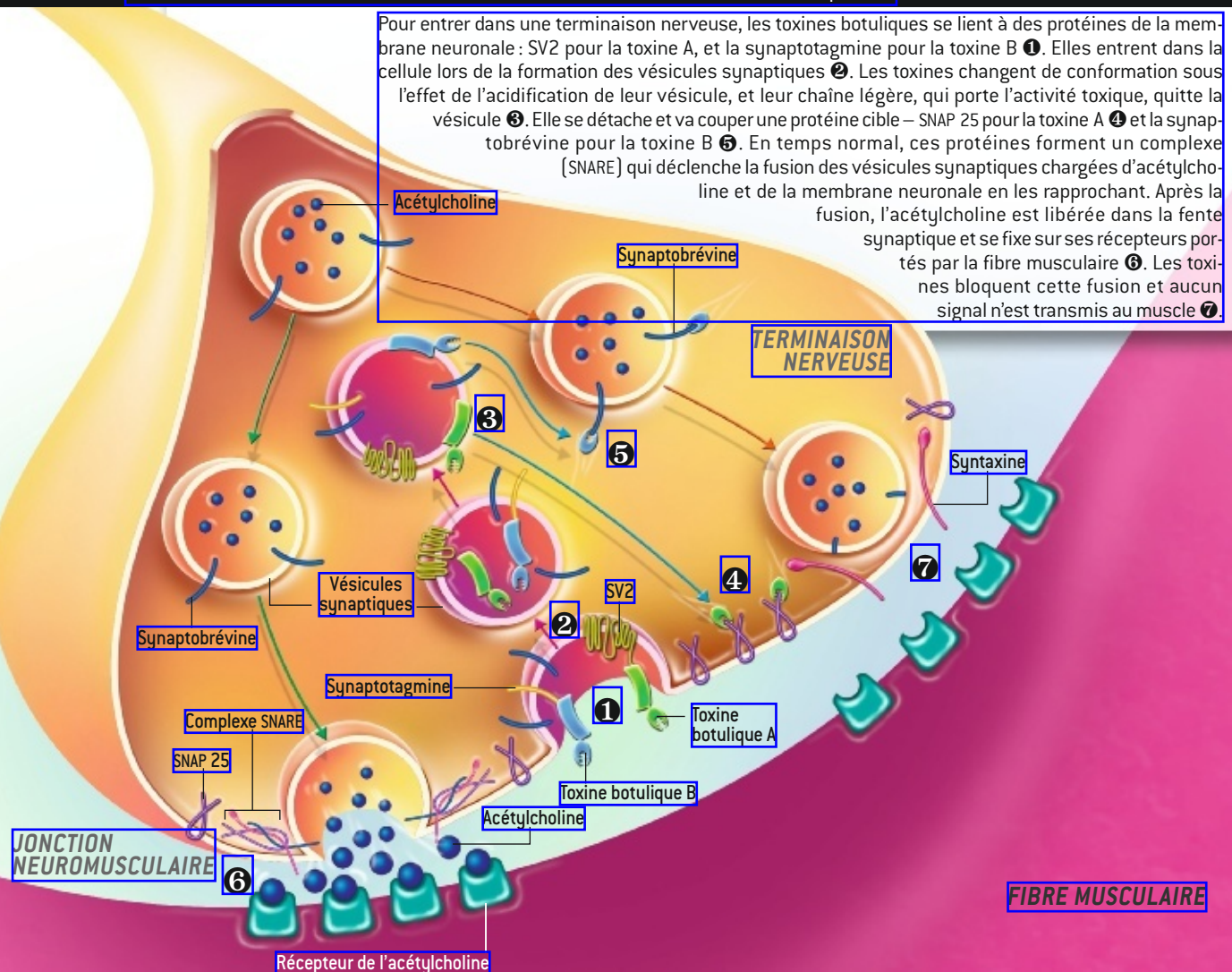
n'est donc pas libérée et le muscle ne peut se contracter.

Cet effet paralysant des toxines botuliques est responsable de leur toxicité dans les cas de botulisme. Mais ce qui est original avec ces molécules, c'est qu'elles sont aussi utilisées en médecine pour corriger des dysfonctionnements dans plusieurs maladies.

De façon générale, les toxines botuliques A et B – les deux seules utilisées en médecine sur les sept sérotypes – sont indiquées dans un nombre croissant de phénomènes physiopathologiques. La formulation médicale de ces toxines – dosage, sérotype utilisé – varie en fonction de la pathologie considérée. L'injection de toxine botulique est pratiquée localement pour relaxer un groupe musculaire trop stimulé par des neurones moteurs : la toxine

LE MÉCANISME D'ACTION DES TOXINES BOTULIQUES

Pour entrer dans une terminaison nerveuse, les toxines botuliques se lient à des protéines de la membrane neuronale : SV2 pour la toxine A, et la synaptotagmine pour la toxine B ①. Elles entrent dans la cellule lors de la formation des vésicules synaptiques ②. Les toxines changent de conformation sous l'effet de l'acidification de leur vésicule, et leur chaîne légère, qui porte l'activité toxique, quitte la vésicule ③. Elle se détache et va couper une protéine cible – SNAP 25 pour la toxine A ④ et la synaptobrevine pour la toxine B ⑤. En temps normal, ces protéines forment un complexe [SNARE] qui déclenche la fusion des vésicules synaptiques chargées d'acétylcholine et de la membrane neuronale en les rapprochant. Après la fusion, l'acétylcholine est libérée dans la fente synaptique et se fixe sur ses récepteurs portés par la fibre musculaire ⑥. Les toxines bloquent cette fusion et aucun signal n'est transmis au muscle ⑦.



Le Botox, un marché lucratif

Initialement réservée à quelques pathologies neurologiques, la toxine botulique a, depuis une dizaine d'années, fait irruption en médecine esthétique, devenant un phénomène sociétal... et économique.

Qui n'a pas déjà entendu que tel acteur, actrice, personnage public s'est « fait faire des injections de Botox » ? Combien de unes de magazines ont détaillé l'« avant/après », les « nouveaux visages », les « ratés » d'une modification faciale ou corporelle d'une personnalité – souvent une femme – dont la vie est mise en scène dans les médias ?

Injectées près des rides du visage, les toxines botuliques (types A et B) les estompent en relâchant les muscles qui les sous-tendent. Le développement d'un tel agent, présen-

tant une activité transitoire et réversible, s'est révélé très lucratif pour *Allergan* et les autres sociétés qui le distribuent. Les actes de chirurgie et de der-



matologie esthétiques s'étant banalisés depuis une quinzaine d'années, l'usage extramédical de toxine botulique est, sinon courant, du moins répandu dans les sociétés occidentales, qui valorisent la jeunesse, le corps et le bonheur individuel. Non plus réservée à une

clientèle riche et célèbre, l'injection de Botox est, pour certains, l'occasion de se faire plaisir : qui ne voudrait d'une biotoxine aux effets secondaires réels, mais limités (l'injection de Botox peut engendrer hématomes et migraines) et qui apporte un aspect rassurant ?

En 2009, le chiffre d'affaires du Botox s'est élevé à environ 1,28 milliard de dollars, ce qui représente pour *Allergan* quasiment le tiers de ses revenus. Pourtant, l'usage de la toxine botulique n'est pas sans risque. D'abord, on connaît encore mal les effets à long terme d'injections répétées. Surtout, par l'aspect transitoire de son effet paralysant, la toxine peut créer une addiction à la médecine esthétique, entraînant le patient dans une quête sans fin du visage parfait.

tique des injections au niveau de l'œsophage en cas de trouble moteur du tube digestif, du sphincter anal en traitement d'une fissure anale, ou à proximité de glandes hyperactives, ce qui réduit leurs sécrétions (transpiration, larmolement, salivation).

Chaque traitement par la toxine botulique étant transitoire – les neurones intoxiqués récupèrent leur activité au bout de quelques mois –, il doit être renouvelé dès la réapparition des troubles. C'est aussi le cas des injections de toxine botulique à visée esthétique, qui estompent temporairement les rides en relâchant les muscles du visage. Un domaine lui aussi en expansion (voir l'encadré ci-contre).

De multiples usages thérapeutiques

Enfin, les toxines botuliques sont des outils précieux en recherche. Par leurs effets sur les neurones, elles ont permis de disséquer les mécanismes de la libération des neurotransmetteurs. Ainsi, le rôle des protéines SNARE dans l'exocytose des vésicules synaptiques a été mis en évidence grâce aux toxines botuliques, dont elles sont les cibles.

La recherche médicale explore aussi de nouvelles pistes thérapeutiques. Le mécanisme d'entrée des toxines botuliques étant à présent assez bien connu, on envisage d'utiliser les toxines comme « vecteurs » de molécules à visée thérapeutique. L'idée est simple : la toxicité des toxines botuliques étant contenue dans leur chaîne légère, on pourrait remplacer cette dernière par une molécule thérapeutique (ADN, enzyme, peptide). En se liant à son récepteur sur la membrane neuronale, la chaîne lourde de la toxine insérerait alors spécifiquement une molécule thérapeutique dans les terminaisons nerveuses, où elle pourrait corriger des dysfonctionnements de certains neurones. Une application possible pourrait être la prise en charge de la douleur dans des fibres sensorielles, ou le traitement de maladies lysosomales – qui perturbent le recyclage des molécules dans les cellules, notamment les neurones.

« Les poisons peuvent être utilisés comme moyens de destruction de la vie ou comme agents pour le traitement du malade », écrivait en 1875 Claude Bernard, le père de la physiologie expérimentale, dans *La science expérimentale*. Les toxines botuliques en sont une démonstration. ■

provoque le relâchement du muscle en bloquant la libération de l'acétylcholine. Les muscles concernés sont en premier lieu des muscles squelettiques ou lisses.

Plusieurs spécialités médicales utilisent la toxine botulique, parmi lesquelles l'ophtalmologie, la neurologie, la dermatologie, la gastro-entérologie et la prise en charge de la douleur. En ophtalmologie, la première indication d'usage de la toxine botulique A est la correction des formes de strabisme,

CHAQUE TRAITEMENT À LA TOXINE BOTULIQUE

étant transitoire, il doit être renouvelé dès la réapparition des troubles.

la toxine s'étant révélée une alternative non invasive à la chirurgie. Le blépharospasme – des clignements spontanés et incontrôlables des paupières – a aussi pu être contrôlé par injection de toxine. D'autres dystonies bénéficient de l'activité inhibitrice de la toxine botulique A : la crampe de l'écrivain (contraction anormale des muscles de l'avant-bras lors de l'écriture), les dystonies cervicales (perturbation du tonus musculaire de la nuque), le spasme hémifacial. Le champ d'usage des toxines botuliques s'est même étendu au-delà des troubles des muscles squelettiques : on pra-

En kiosque le 29 février

Cerveau & Psycho

n°50

**Faites l'expérience de la psychologie
et des neurosciences avec la**

nouvelle formule

Encore plus de

Variété & Sobriété

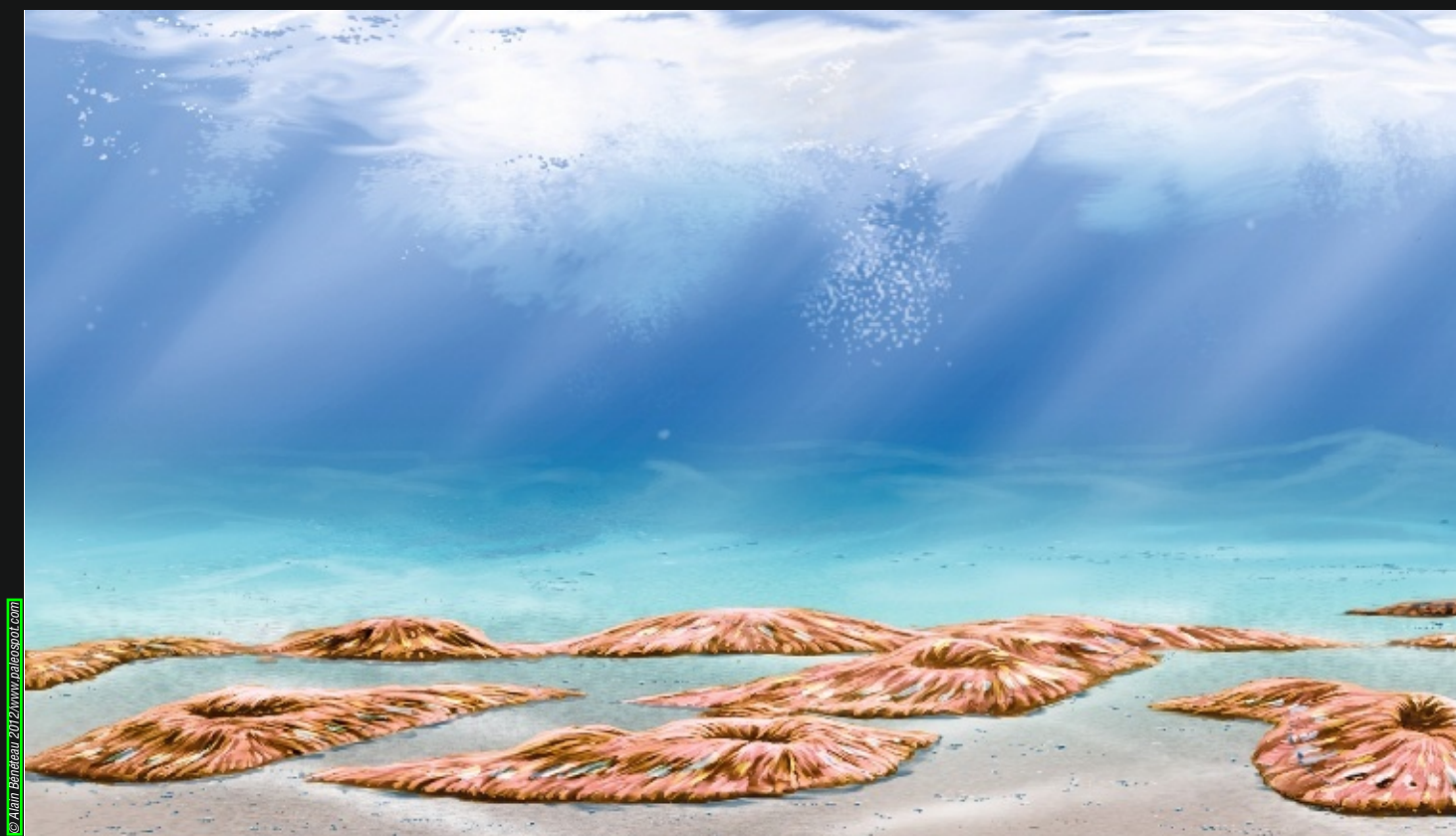
Clarté & Rigueur

Informations & Illustrations

Le Gabon à l'aube de la **vie**

Pascal Bouton, Alain Préat, Denis Thiéblemont et Michel Ebang Obiang

Les géologues ont révélé dans le sous-sol du Gabon un environnement datant d'il y a deux milliards d'années. Riche en formes de vie primitive, il aurait accueilli les premiers organismes pluricellulaires.



© Alain Préat 2012 www.palaisdelasol.com

En juillet 2010, des recherches menées dans le bassin de Franceville, au Sud-Est du Gabon, dans la forêt équatoriale du bassin du Congo, ont livré des résultats déconcertants. L'équipe d'Abderrazak El Albani, de l'Université de Poitiers, a mis au jour de possibles organismes pluricellulaires eucaryotes (c'est-à-dire dont les cellules ont un noyau) – des métazoaires –, datant de plus de deux milliards d'années (voir la figure 1 et l'encadré page 57).

Ces fossiles ont suscité un émoi chez les spécialistes de l'origine de la vie. Cette découverte rendrait caduque l'hypothèse communément admise jusqu'alors de l'« explosion cambrienne », intervenue il y a environ 600 millions d'années et au cours de laquelle les formes de vie complexe seraient apparues : les fossiles gabonais en question sont en effet antérieurs de plus d'un milliard d'années. Cette découverte a attiré notre attention sur d'autres formes intrigantes qui ont été identifiées dès 1966 dans cette même région.

La signification biologique de ces nouveaux fossiles reste à trancher par les paléontologues. Mais il revient aux géo-

L'ESSENTIEL

✓ Grâce au très bon état de préservation des couches sédimentaires du bassin de Franceville, au Sud-Est du Gabon, les géologues ont reconstitué le paysage tel qu'il était il y a deux milliards d'années.

✓ Différents types de milieux coexistaient : des platiers, des lagunes salées, des mers intérieures bordées de volcans en activité...

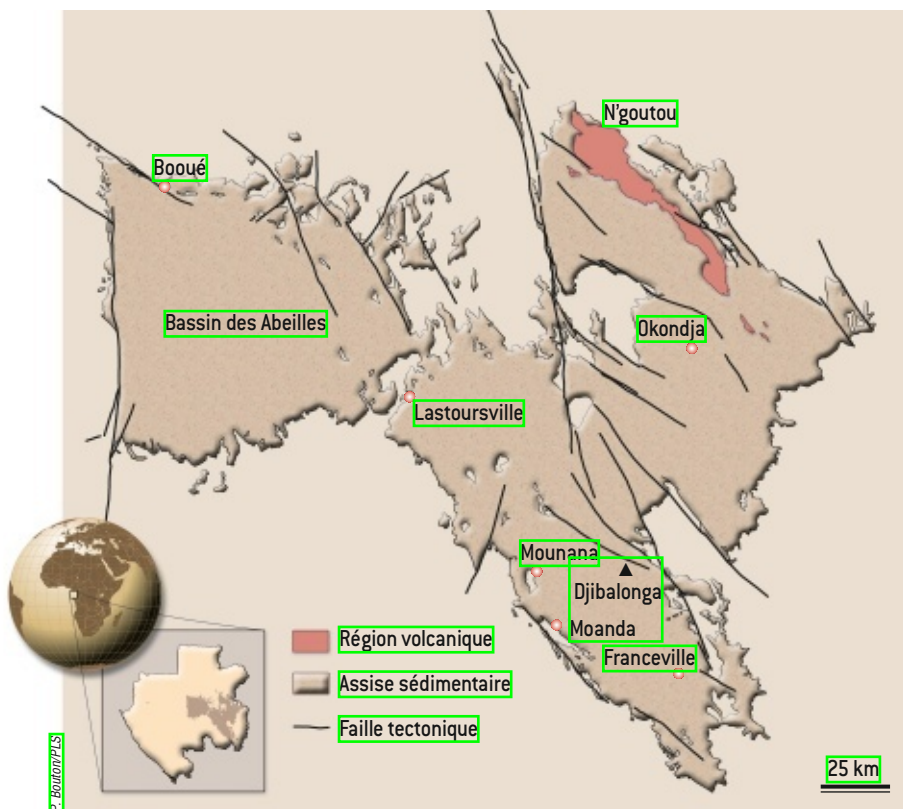
✓ Une biodiversité importante s'y développait, avec des formes de vie intrigantes qui remettent en cause les hypothèses sur l'apparition des premiers organismes complexes.

logues de décrire les milieux où ces organismes se seraient développés. C'est le travail auquel nous nous sommes attelés à l'occasion de la nouvelle cartographie géologique du pays, conduite de 2005 à 2010 par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières, en France) pour l'État gabonais. Nous avons redécouvert les sous-sols de cette région équatoriale proche de la ville de Franceville, explorés depuis les années 1930 pour leurs nombreuses ressources minières.

Les sédiments déposés au Paléoproterozoïque, période du Précambrien comprise entre 1,6 et 2,5 milliards d'années, sont exceptionnellement bien préservés en raison de la faible activité tectonique qu'a connue la région depuis lors. C'est ce qui permet de reconstituer son aspect à cette époque. Nous y avons trouvé, sur une assez faible étendue (moins de 30 000 kilomètres carrés, l'équivalent d'environ quatre départements français), les traces d'un environnement complexe et cohérent qui n'est pas sans évoquer des paysages actuels : des volcans jouxtaient des lagunes et des mers peu profondes,



1. IL Y A DEUX MILLIARDS D'ANNÉES, la région de Franceville, au Gabon, regorgeait de lagunes et de mers peu profondes, sous un climat vraisemblablement chaud et aride. On y trouvait des hauts-fonds recouverts de stromatolithes (à droite), structures minérales édifiées par des colonies de cyanobactéries. En 2008 ont été découverts des fossiles étonnants mesurant quelques centimètres. Ils correspondraient à des organismes marins pluricellulaires (à gauche et au centre) évoluant à plus grande profondeur que celle des platiers à stromatolithes. Ces métazoaires seraient antérieurs de plus d'un milliard d'années aux formes de vie complexe connues jusqu'à présent...



2. LA FORMATION DU FRANCEVILLIEN, AU GABON. Elle occupe trois bassins sédimentaires datant du Paléoprotérozoïque (entre 1,6 et 2,5 milliards d'années) : le bassin des Abeilles, celui de Franceville et celui d'Okondja, bordé par l'important édifice volcanique de N'goutou.

lesquelles hébergeaient de nombreuses formes de vie, telles des colonies de bactéries et des algues unicellulaires. Mais avant de décrire ces milieux et leurs liens avec la vie ancienne, nous allons d'abord présenter le contexte dans lequel cette partie du Gabon a été étudiée, puis expliquer ses caractéristiques géologiques.

La région (voir la figure 2) a été décrite pour la première fois par l'explorateur français d'origine italienne Pierre Savorgnan de Brazza, fondateur de la future Brazzaville (actuelle capitale de la République du Congo), qui a ouvert la voie à la colonisation de l'Afrique centrale. Il reconnut les lieux entre 1876 et 1880, lors de sa remontée du fleuve Ogooué, à la recherche de la source du Congo. En 1881, il fonda un poste près du village de Masuku, qu'il renomma Franceville.

La connaissance géologique de la région s'est affinée au cours de prospections minières menées à partir des années 1930. Le nom de Francevillien a été donné en 1954 à ces terrains sédimentaires, dont la description se précisa grâce aux explorations menées par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) entre 1955

et 1966. Le sous-sol de la région de Franceville s'est révélé très riche en manganèse et uranium. Il connut une grande notoriété scientifique lorsque l'on découvrit (en 1972) que sa richesse en uranium était telle qu'elle avait déclenché une réaction nucléaire spontanée il y a deux milliards d'années (le réacteur nucléaire naturel d'Oklo).

Un bassin géologique très bien conservé

En dépit de leur excellente préservation, ces couches (voir la figure 3) n'ont pas suscité l'intérêt paléontologique porté à d'autres terrains datant de la même période, tels que la formation de Duck Creek, dans l'Ouest de l'Australie, vieille de 1,8 milliard d'années, ou celle de Gunflint (1,9 milliard d'années) qui affleure sur la côte Nord-Ouest du lac Supérieur, en Amérique du Nord. Dans cette dernière formation, plus facile d'accès, des microfossiles ont été décrits dès 1953, puis présentés en 1965 à la communauté scientifique. On y a décelé en particulier des micro-organismes sphériques, interprétés comme des eucaryotes unicellulaires.

Ce n'est que récemment qu'une analyse plus fine des roches a révélé, dans les couches géologiques du Francevillien, la trace de nombreuses formes de vie différenciées (voir l'encadré page 57). Notamment, nous avons mis au jour plus d'une centaine de gisements à stromatolithes (littéralement « tapis de pierre »), des constructions d'origine biologique. Ces structures en couches sont édifiées par des filaments enchevêtrés de cyanobactéries photosynthétiques à partir de fines particules minérales accumulées par piégeage ; ces formes de vie primitive sont probablement apparues il y a 3,5 milliards d'années (ce sont les plus anciennes formes de vie connues). On trouve également en abondance des microsphères, de tailles comprises entre 30 et 40 micromètres, possibles traces fossilisées d'algues unicellulaires à chlorophylle, dont les plus anciens spécimens connus datent de 3,3 milliards d'années.

Plus largement, les sédiments se caractérisent par leur teneur élevée en carbone organique, qui peut atteindre 20 pour cent dans certaines couches (une roche contenant plus de deux pour cent de matière organique peut être considérée comme riche) : c'est un autre témoignage de la prolifération de la vie en ces lieux il y a deux milliards d'années.

Notre campagne cartographique a dépassé les seuls environs de Franceville, où se sont concentrées la plupart des études antérieures. Nous avons été confrontés aux difficiles conditions de l'exploration géologique en forêt équatoriale. Si les moyens de localisation se sont aujourd'hui améliorés – le GPS a remplacé la navigation à la boussole –, les accès par pistes ou rivières navigables restent peu abondants.

Le couvert forestier très dense ne permet pas de repérer les affleurements rocheux à distance, ni depuis le sol ni par vue aérienne ou satellitaire. La recherche des roches nécessite de longues marches en forêt, souvent les pieds dans l'eau. Les roches étant altérées sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, leur observation et leur échantillonnage s'effectuent le long des ruisseaux et marécages. Dans les régions peu accidentées, il faut parfois plusieurs jours de marche pour collecter quelques blocs rocheux dignes d'intérêt.

Examinons plus en détail la géologie de la formation du Francevillien. Ce terme regroupe des couches sédimentaires et volcaniques qui datent du Paléoprotérozoïque. La formation occupe trois bassins

sédimentaires localisés dans les parties centrale et orientale du Gabon : les bassins des Abeilles, de Franceville et d'Okondja (voir la figure 2). Elle repose sur un socle granitique plus ancien, qui date de 2,7 à 3,1 milliards d'années (Archéen).

La plupart des terrains francevilliens sont horizontaux : les couches sédimentaires, préservées des grands phénomènes tectoniques depuis leur dépôt, sont peu déformées. Après son dépôt, un sédiment est transformé en roches sous l'effet de la température et de la pression (compaction). Dans le cas du Francevillien, ces modifications ont été faibles, si bien que l'état de conservation est exceptionnel pour des roches si anciennes. Cela explique qu'elles aient pu préserver les fossiles découverts par l'équipe de A. El Albani, ainsi que de nombreuses autres formes de vie primitive.

Des fossés qui se sont comblés de sédiments

Le Francevillien se présente comme la superposition de trois grandes entités géologiques, déposées successivement (voir la figure 4), probablement entre 2,1 et 2,0 milliards d'années. L'unité la plus ancienne, nommée Francevillien A, est composée de sables et graviers de quartz (transformés en grès), provenant de l'érosion du socle archéen sur lequel elle repose. Ces dépôts ont été charriés par de puissants cours d'eau. On observe à leur sommet une influence marine de plus en plus nette avec une alternance de sables fins et d'argiles, dépôt caractéristique du flux et reflux de la marée.

Après le dépôt de cette première unité, un événement tectonique majeur s'est produit. L'extension de la croûte continentale a provoqué, par endroits, l'effondrement du terrain, ce qui a créé des fossés étroits d'une cinquantaine de kilomètres, encadrés par des domaines plus stables. Dans le même temps, une quantité importante de sédiments s'est déposée dans ces fossés d'effondrement : des sables et des argiles noires riches en matière organique qui définissent le Francevillien B. Ces dernières ont été transformées par enfouissement en schistes noirs, les ampélites. Ce sont ces ampélites, dont l'épaisseur atteint par endroits 2500 mètres, qui ont livré les formes fossiles décrites par l'équipe d'A. El Albani. La sédimentation a également été alimentée par des débris produits par les volcans voisins du complexe de N'goutou,

situé au Nord d'Okondja. Le poids croissant de ces sédiments a contribué à l'affaissement des fossés. Ce lent enfoncement, la « subsidence », est à l'origine des deux principaux fossés d'effondrement que sont les bassins de Franceville et d'Okondja. Ces fossés tectoniques (ou grabens) avaient l'aspect du fossé rhénan ou des fossés de Limagne, en Auvergne.

Durant cette période, en dehors des bassins d'effondrement de Franceville et d'Okondja, dans les domaines stables tel le bassin des Abeilles, la sédimentation a été beaucoup moins importante : elle se limite à une couche d'épaisseur comprise entre 50 à 100 mètres, constituée d'ampélites, de jaspes noirs (roches à grain fin constituées essentiellement de silice) et parfois de dolomies (roches carbonatées riches en magnésium). Ces dépôts se sont généralisés à l'ensemble de la région lorsque la subsidence à l'origine des fossés de Franceville et d'Okondja s'est affaiblie. Dans ces bassins, le Francevillien B est alors couronné d'un niveau sédimentaire composé de dolomies et de jaspes, nommé Francevillien C. L'ensemble du Francevillien B et du Francevillien C constitue la deuxième grande entité géologique du Francevillien.

Au-dessus de cette assise, on retrouve des dépôts constitués principalement de grès et de pélites (roches finement détritiques et argileuses), qui forment le Francevillien D, puis le Francevillien E. La datation isotopique des premières couches

LES AUTEURS

Pascal BOUTON, géologue et créateur de l'entreprise *Oolite*, est spécialisé en cartographie géologique et en sédimentologie.

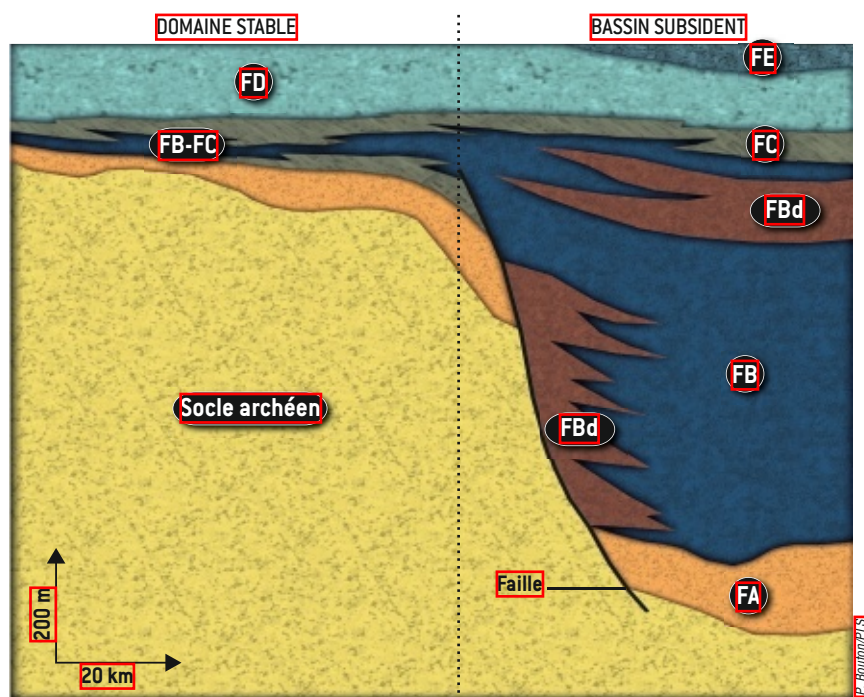
Alain PRÉAT est professeur à l'Université libre de Bruxelles où il dirige l'Unité de Sédimentologie et géodynamique des bassins.

Denis THIÉBLEMONT, géologue et géochimiste au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) à Orléans, a dirigé le projet de cartographie géologique du BRGM au Gabon.

Michel EBANG OBIANG est ingénieur géologue à la Direction des mines et de la géologie du ministère des Mines du Gabon, à Libreville.



3. UNE FALAISE DE GRÈS FLUVIAILES, près de Moanda. Ces roches appartiennent au Francevillien A, la couche de sédiments la plus ancienne de la région. Des affleurements naturels de cette qualité, non masqués par la végétation, sont exceptionnels en milieu équatorial.



4. LE DÉPÔT DE LA COUCHE SÉDIMENTAIRE du Francevillien A (FA, couche de grès) a précédé un phénomène tectonique qui a formé des fossés d'effondrement (ou de subsidence). L'accumulation de sédiments (FB : argilites riches en matière organique ; FBd : produits détritiques issus de l'érosion des marges des bassins et du volcanisme) a été plus abondante dans ces bassins, jusqu'à ce que la subsidence cesse. Ensuite, les dépôts se sont uniformisés (couches supérieures ; FC : dolomies et jaspes ; FD : grès et pélites ; FE : grès).

du Francevillien D leur donne une ancienneté de 2,08 milliards d'années. Il s'ensuit que les niveaux fossilifères du Francevillien B et du Francevillien C, plus profonds, sont à peu près de cet âge, ou un peu plus anciens.

Des environnements diversifiés contrôlés par la tectonique

Ce sont ces couches du Francevillien B et C qui contiennent des traces de formes de vie organisées, des stromatolithes, des microsphères, ainsi que les fossiles découverts par l'équipe d'A. El Albani. Dans quels environnements se sont développés ces organismes primitifs ? Nous avons pu reconstituer le puzzle en analysant les roches sédimentaires, leur localisation, leur contenu isotopique et en étudiant les bioconstructions qui y sont conservées. Il en ressort que ces milieux se répartissent en fonction du contexte tectonique de l'époque.

Les domaines stables, c'est-à-dire non touchés par la tectonique, comme le bassin des Abeilles, comportaient des dépressions peu profondes qui accueilleraient des mers intérieures ou des lagunes riches

en matière organique. Leurs rivages étaient constitués d'étendues très peu profondes, où proliféraient les stromatolithes, et de plaines côtières sursalées. Ces mêmes environnements se retrouvaient sur les hauts-fonds séparant les fossés subsidents de Franceville et d'Okondja. Ces derniers étaient occupés par des mers étroites, sans doute plus profondes, bordées de reliefs montagneux et parfois de volcans en activité (un peu à l'image du graben rhénan à l'époque tertiaire).

Les domaines stables et les hauts-fonds couvraient de grandes superficies, du bassin des Abeilles à la région de Lastoursville, et s'étendaient également entre les bassins d'effondrement. L'analyse sédimentologique distingue plusieurs types de milieux au sein de ces zones (voir la figure 5). L'abondance des stromatolithes indique la présence d'étendues planes, où l'eau était très peu profonde : ces environnements marins, nommés platiers, sont particulièrement favorables à l'apparition de ces constructions biologiques (comme on peut en trouver aujourd'hui dans les eaux peu profondes du littoral Ouest de l'Australie, dans la baie des Requins). Les stromatolithes francevilliens rassemblent une grande diversité morphologique, qui indique la coexistence dans ces platiers de conditions écologiques (agitation de l'eau, profondeur, etc.) variées (voir la figure 6).

Les récifs constitués de stromatolithes ramifiés correspondraient plutôt à des eaux peu profondes et agitées : leurs branches piègent les débris d'autres stromatolithes brisés par la houle ou les courants. Certains de ces récifs ont plus d'une centaine de mètres d'extension horizontale. D'autres édifices isolés forment des colonnes atteignant plusieurs mètres de hauteur ; ils révèlent des milieux toujours fortement agités, mais probablement situés sous la zone de balancement des marées. Il pourrait s'agir de chenaux de marée ou de passes séparant des lagunes. On rencontre dans ces environnements des oncoïdes, granules concentriques ovoïdes de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre résultant de l'activité de cyanobactéries. Aujourd'hui, on en trouve dans les eaux agitées de la zone de balancement des marées des Bahamas ou du golfe Persique.

Plus au large, les dépressions marines étaient le siège d'une sédimentation de vases noires, riches en matière organique. Cette matière organique proviendrait de la dégradation continue des édifices micro-

biens colonisant les platiers situés à leur périphérie. Sa préservation indique que le fond de ces bassins était dépourvu d'oxygène libre, qui l'aurait dégradée. Ces conditions anaérobies devaient probablement être atteintes à relativement faible profondeur, comme l'indique la présence de couches sédimentaires intertidales, subissant l'alternance des marées, donc proches de la surface. Nous imaginons ces milieux de dépôt comme des mers peu profondes ou des lagunes interconnectées.

Des lagunes salées sous un climat chaud

Certaines de ces lagunes, isolées du milieu marin, ont vu leurs caractéristiques chimiques se modifier sous l'effet d'une forte évaporation. Les ions en solution se sont alors concentrés, jusqu'à ce qu'ils précipitent sous la forme de boues carbonatées riches en magnésium (la dolomie) et de sels (dépôts évaporitiques). On les retrouve dans les régions de Lastoursville et Franceville (dans le site de Djibalonga), où les dolomies contiennent des minéraux évaporitiques typiques de milieux sursaturés en sels (cristaux de sulfate de sodium). Ces sédiments suggèrent un environnement de lagunes confinées, calmes et peu profondes, dans un climat chaud, aride à

semi-aride. Un exemple actuel peut être fourni par les sebkhas littorales du golfe Persique, également colonisées par des stromatolithes. Cette interprétation est confirmée par l'analyse des isotopes de l'oxygène dans les dolomies (une forte évaporation favorise l'appauvrissement des dolomies en oxygène 16, l'isotope léger de l'oxygène).

Quant aux fossés d'effondrement de Franceville et d'Okondja, formés par subsidence, ils étaient occupés par des mers plus profondes, sièges d'une sédimentation argileuse épaisse, riche en matière organique (roches ampélitiques). Cette matière organique provient ici aussi, sans doute en grande partie, des stromatolithes présents sur les platiers à la périphérie des bassins. On peut aussi envisager une participation du phytoplancton, dont témoignerait la présence d'acritarches (terme dérivé du grec *akritos*, signifiant incertain ou confus, et de *arche*, signifiant origine), microfossiles dont on ignore la nature précise (voir l'encadré page 57) : algue, spore, champignon ? Enfin, cette matière organique pourrait avoir une origine locale, résultat de la colonisation du fond marin par des organismes similaires à ceux découverts par l'équipe de A. El Albani.

Comment expliquer qu'une telle quantité de matière organique ait été conservée ?

BIBLIOGRAPHIE

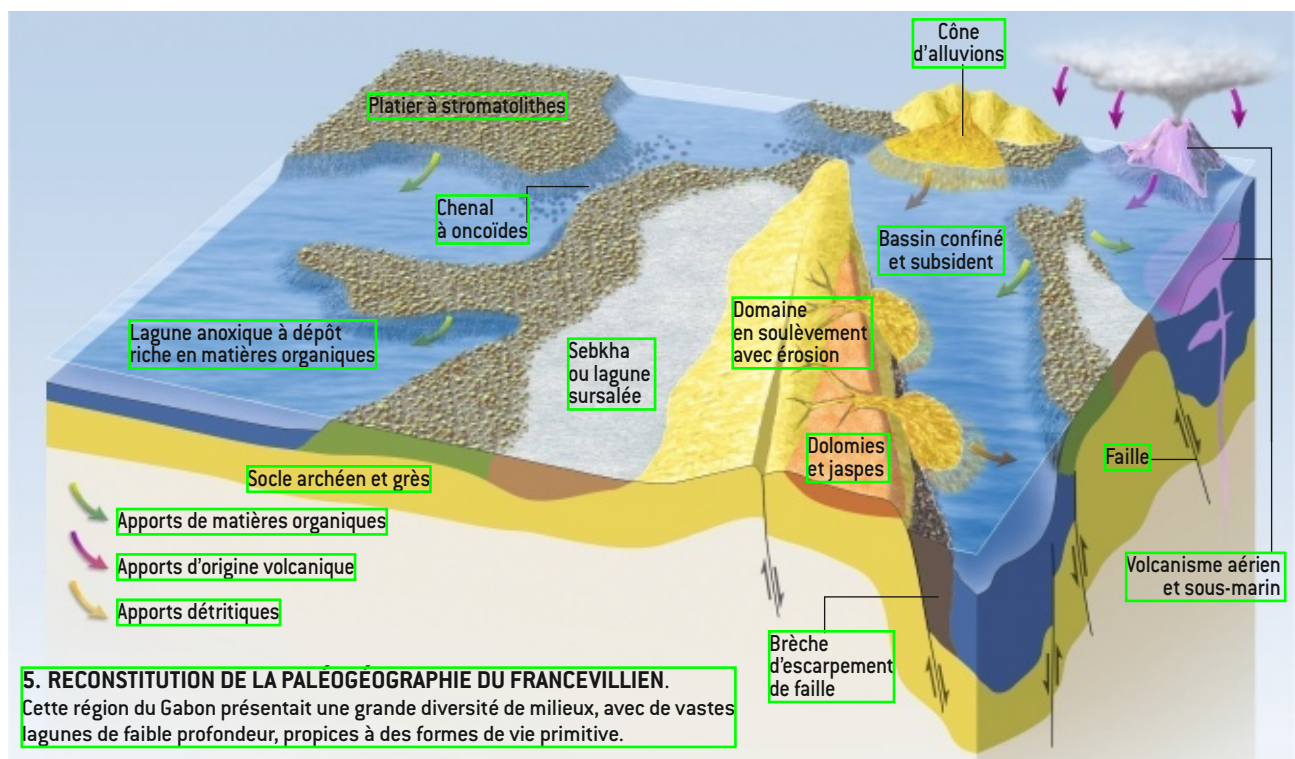
A. Préat *et al.*, Paleoproterozoic high $\delta^{13}\text{C}$ dolomites from the Lastoursville and Franceville basins (SE Gabon) : stratigraphic and syndimentary subsidence implications, *Precambrian Research*, vol. 189, pp. 212-228, 2011.

A. Meinesz, Comment la vie a commencé, Belin, 2^e édition, 2011.

A. El Albani *et al.*, Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1 Gyr ago, *Nature*, vol. 466, pp. 100-104, 2010.

S. Simpson, Premières traces de vie, *Pour la Science*, n° 308, juin 2003.

R. Feys *et al.*, À propos de l'ancienneté de la flore continentale : découverte de « charbons » et de « Phytomorphes » dans le Francevillien [Précambrien du Gabon], *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 7, pp. 638-641, 1966.



En 1966, Robert Feys, Charles Greber et Michel Pascal, trois géologues français du BRGM, ont présenté des charbons collectés lors de reconnaissances géologiques dans le Francevillien. Ces trouvailles auraient dû intriguer la communauté scientifique. L'examen au microscope montrait des restes organisés qui, selon les découvreurs, se rapprochent des Botryococcées (*Botryococcus* est une algue verte d'eau douce). Ces charbons se seraient donc formés par l'accumulation d'algues (a).

L'article relatant la découverte dans le bulletin de la Société géologique de France n'eut guère de retentissement, sans doute en raison de sa conclusion spectaculaire, selon laquelle ces charbons témoigneraient de l'extrême ancienneté de la colonisation des

continents par les végétaux, alors que les premières plantes terrestres connues datent d'environ 400 millions d'années.

Deux ans plus tard, Francis Weber, de l'Université de Strasbourg, mentionne des formes sphériques qu'il qualifie prudemment d'organismes « possibles » (b). Mesurant 30 à 40 micromètres, elles proviennent de jaspes du Francevillien C, roches silicifiées riches en matière organique. Contrairement aux microfossiles de la formation de Gunflint, en Amérique du Nord, ces sphères ne feront l'objet d'aucune étude spécifique et tomberont dans l'oubli durant une trentaine d'années.

Les auteurs de cet article les ont retrouvées lors de nouveaux prélèvements observés en lames minces (b). Elles peuvent être qualifiées d'acritarches, terme généra-

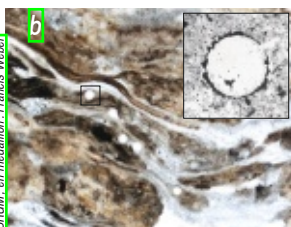
que décrivant des systèmes organiques, en forme de spores, dont la nature biologique n'est pas connue. Certaines pourraient être des algues vertes unicellulaires.

Les formes de vie les plus évidentes et les plus communes n'ont été décrites qu'en 1992 et 1997 par Janine Bertrand-Sarfati, Benoît Potin et Bertrand Amard, de l'Université de Montpellier. Il s'agit de constructions stromatolithiques découvertes à proximité de Franceville. Elles forment une association de microfossiles équivalente à celle retrouvée dans la formation de Gunflint, qui lui est presque contemporaine. Parmi les 13 taxons identifiés figurent deux microbiotes communs de Gunflint : *Gunflintia*, un filament bactérien (c), et *Huroniospora*, une microsphère de six à huit micromètres de diamètre.

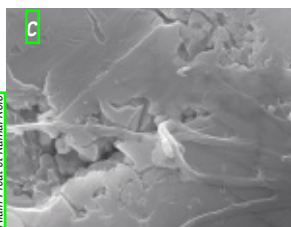
Enfin, l'équipe internationale coordonnée par Abderrazak El Albani, de l'Université de Poitiers, a récemment mis au jour quelque 250 supposés fossiles mesurant entre 10 et 120 millimètres (d). La microtomographie à haute définition (par rayons X) met en évidence une organisation interne élaborée : des lamelles qui semblent assez flexibles entourent un centre plus dense, structure qui diffère de celles des concrétions minérales, d'ordinaire assez régulières. De plus, l'analyse des isotopes du carbone et du soufre indique qu'elles ont une origine organique. Ces chercheurs y voient les traces de possibles colonies bactériennes, ou plutôt d'organismes pluricellulaires eucaryotes (c'est-à-dire dont les cellules sont pourvues d'un noyau).



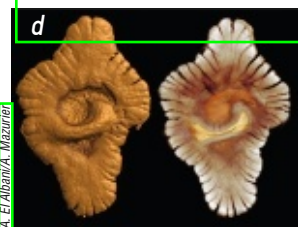
R. Feys et al., Bull. Soc. Géol. de France



BRGM - en médaillon : Francis Weber



Alan Trear et Kamal Koko



A. El Albani, A. Marzouk

Une stratification des eaux identique à celle décrite précédemment pour les domaines de plates-formes a permis à la matière organique, produite dans la tranche superficielle oxygénée des plans d'eau, d'atteindre les parties plus profondes où l'absence d'oxygène l'a protégée de la dégradation. La forte subsidence des bassins a enfin assuré un enfouissement rapide, favorisant sa préservation dans les sédiments. Ces conditions anaérobies ont pu se développer en raison de l'exiguïté des bassins, qui empêchait une bonne circulation des masses d'eau et favorisait donc leur stratification.

Au sein de l'accumulation sédimentaire argileuse des fossés d'effondrement, on trouve des corps détritiques grossiers, qui constituent la principale spécificité de ces bassins par rapport aux domaines stables. Ces conglomérats contiennent des blocs de roches archéennes (granites et gneiss) et francevilliennes (grès, dolomies et jaspes à stromatolithes). Ils indiquent une forte érosion des bordures émergées du bassin, périodiquement

rehaussées par l'activité tectonique. Ce phénomène a alimenté la sédimentation sous-marine en coulées de débris et de sables grossiers, que l'on retrouve dans les dépôts du Francevillien B.

Cette couche géologique contient également des roches volcaniques qui contribuent elles aussi au remplissage des fossés. L'activité volcanique se situe principalement dans la région d'Okondja, où le puissant complexe volcanique de N'goutou est à l'origine de coulées sous-marines qui s'intercalent dans les dépôts sédimentaires. Les matériaux magmatiques qui en sont issus pourraient être la source du fer et surtout du manganèse, que l'on trouve en abondance dans le Francevillien (la mine de Moanda, près de Franceville, est l'un des plus riches gisements de manganèse au monde).

Ces bassins francevilliens, où des formes primitives de vie se sont développées, constituent un objet d'étude de choix. La conjonction entre une forte subsidence, qui a conduit à un enfouissement rapide des

sédiments, et une anoxie généralisée, laquelle a préservé la matière organique de la dégradation par l'oxygène, est à l'origine de la très bonne préservation des fossiles d'organismes qui colonisaient la région il y a deux milliards d'années.

Des milieux stérilisés par le volcanisme ?

Mais ces milieux favorables à la vie et ces conditions de préservation idéales semblent avoir disparu à la fin du Francevillien C. Cette couche géologique est systématiquement couronnée par une à plusieurs dizaines de mètres de roches silicifiées : les jaspes. La silice imprègne alors les roches sédimentaires, mais aussi les roches d'origine volcanique.

Il est possible qu'une intensification de l'activité volcanique ait produit suffisamment de cendres pour stériliser les écosystèmes et apporter la silice nécessaire à la formation des jaspes. Cependant, cette hypothèse de la « chape de cendres »

reste à démontrer. L'apport de silice n'est pas systématiquement associé à des débris de roches volcaniques ; de plus, aucun indice géochimique d'un accroissement du volcanisme explosif n'a encore été décelé dans ces roches.

Une autre hypothèse pourrait expliquer la silicification des sédiments. Le Francevillien C correspond en effet à un arrêt de la subsidence des bassins d'effondrement de Franceville et d'Okondja. Par la suite, des milieux très peu profonds, hébergeant les stromatolithes, et des environnements sursalés, similaires aux sebkhas du golfe Persique, se sont généralisés. Dans ces environnements, la forte alcalinité de l'eau (pH supérieur à 9) rend possible la dissolution de la silice ; cette dernière est alors susceptible de précipiter lors d'arrivées d'eaux douces dans le milieu, qui font baisser le pH .

Un tel mécanisme aboutit aux accumulations siliceuses, tel le silex, dans les dépôts lacustres des zones intertropicales soumises à une forte évaporation. Reste à connaître l'origine des apports de silice, dissoute ou sous forme de débris, néces-



6. CONSTRUCTIONS STROMATOLITHIQUES trouvées au Gabon. Leur grande variété morphologique reflète la diversité des milieux où elles se sont formées.

saire à la formation des jaspes francevilliens : elle a peut-être été introduite dans le milieu lors des inondations temporaires, voire saisonnières, d'eau douce.

Enfin, à y regarder de plus près, l'horizon de jaspes ne signe pas véritablement la fin de l'histoire biologique de cette région du Gabon. La matière organique reste en effet abondante dans les sédiments plus récents, même si sa production ne semble plus assurée par les milieux à stromatolithes dont on ne trouve pas la trace.

La grande diversité des formes de vie hébergées par les différents environnements marins de la région de Franceville semble s'étioler à la fin du Francevillien. Il est cependant possible que les biotopes décrits se soient développés de nouveau ailleurs. On peut ainsi penser que les possibles organismes pluricellulaires découverts par l'équipe de A. El Albani aient eu une descendance qui a colonisé d'autres régions présentant les mêmes conditions favorables à la vie, mais peut-être pas les conditions de conservation qui nous auraient permis d'en retrouver la trace dans les sédiments, plus de deux milliards d'années plus tard.

universcience présente

les conférences

à la Cité des sciences et de l'industrie

Paroles de Gaulois [les mardis à 18h30]

6 mars L'imaginaire gaulois : rites, religion et croyances

13 mars L'art gaulois : esthétique et symbolique

20 mars Les Gaulois, façonneurs de paysages

Le cosmos vu par les mathématiques [les mercredis à 18h30]

21 mars Le Système solaire est-il chaotique ?

28 mars La galaxie, agitée et en quête de relaxation

4 avril L'Univers est-il courbe ?

Alan Turing, père de l'ordinateur

[jeudi 8 mars à 19h]

Lecture de textes par un acteur, commentée par un scientifique.

entrée libre

au Palais de la découverte

En partenariat avec

Avec le soutien de

SCIENCE FUTURA-SCIENCES toute L'HISTOIRE

encyclo SCIENCES Avenir culture

programme complet sur www.universcience.fr

Les GLOIRES, des auréoles autour des ombres

Les gloires sont des anneaux colorés qui entourent parfois les ombres projetées sur les nuages. Ce phénomène s'explique par un jeu subtil entre la lumière du Soleil et les gouttelettes d'eau en suspension.

Moysés Nussenzveig

L'ESSENTIEL

✓ Les gloires sont des anneaux colorés entourant les ombres d'alpinistes ou d'aéronefs projetées sur les nuages.

✓ Comme dans un arc-en-ciel, les couleurs sont produites par les gouttelettes d'eau microscopiques dont sont formés les nuages.

✓ Mais les gloires ont une origine différente : elles sont une manifestation macroscopique d'un effet dit tunnel, grâce auquel la lumière frôlant une gouttelette passe à l'intérieur, avant d'être renvoyée dans la direction incidente.

Lors d'un vol de jour, asseyez-vous près d'un hublot, du côté opposé au Soleil. Avec un peu de chance, vous observerez l'un des plus beaux phénomènes météorologiques qui soient : un halo multicolore entourant l'ombre de l'avion (voir la figure 1). Ses anneaux irisés ne sont pas ceux d'un arc-en-ciel, mais ceux d'un phénomène plus compliqué, nommé gloire. Plus les nuages sont proches, plus il est spectaculaire, finissant par dominer tout l'horizon.

Les gloires n'auréolent pas seulement les avions. Si vous pratiquez l'alpinisme, vous en avez peut-être déjà admiré une, juste après le lever du soleil, autour de votre propre tête – ou plutôt autour de son ombre projetée sur des nuages proches ou sur la brume (voir la figure 2). Nombre de scientifiques pensent que de telles gloires ont inspiré le nimbe qui entoure la tête des divinités et des empereurs dans l'iconographie orientale et occidentale.

La première publication concernant ce phénomène date de 1748. Elle relate les observations d'une expédition scientifique française, qui avait gravi dix ans plus tôt le volcan Pambamarca, situé sur l'actuel territoire de l'Équateur. Cette expédition s'inscrivait dans le cadre d'une série de voyages, organisés au XVIII^e siècle par

l'Académie royale des sciences pour répondre à des questions portant notamment sur la forme exacte de la Terre. Antonio Ulloa, l'un de ses membres, décrit les gloires comme « trois arcs-en-ciel nuancés de diverses couleurs et entourés à une certaine distance par un quatrième arc d'une seule couleur ». En pratique, on ne voit souvent qu'un ou deux de ces « arcs-en-ciel » circulaires. Il précise que chacun des voyageurs « ne voyait le phénomène que relativement à lui, et était disposé à nier qu'il fût répété pour les autres ».

L'ombre du spectateur ou de l'avion ne joue aucun rôle dans la création d'une gloire, mais elle indique que le Soleil, l'observateur et le nuage sont alignés. Lors de ce phénomène, la lumière solaire « rebondirait » donc sur les nuages et serait renvoyée quasiment dans la direction incidente. Reste à comprendre comment.

On pourrait penser que les gloires, connues depuis des siècles et relevant d'une science « ancienne », l'optique, ont été expliquées depuis longtemps. Pourtant, elles ont défié les scientifiques jusqu'au début des années 2000. En effet, elles sont bien plus compliquées que les arcs-en-ciel – qui ne sont eux-mêmes pas aussi simples que ne le laissent entendre les manuels d'introduction à la physique.



1. LES COULEURS DES ANNEAUX
d'une gloire se déclinent du bleu au rouge en partant de l'intérieur, puis se répètent une ou plusieurs fois. Les premières descriptions du phénomène évoquaient des arcs-en-ciel juxtaposés.

En 1965, j'ai entamé un programme de recherche visant à fournir, entre autres, une explication physique complète du phénomène des gloires. Grâce à diverses collaborations, cet objectif a été atteint en 2003. L'effet tunnel, une propriété physique que l'on décrira, joue un rôle prépondérant dans le mécanisme proposé. Nous verrons que ce dernier, en améliorant notre compréhension des interactions de la lumière du Soleil avec les particules en suspension, aide aussi à modéliser l'impact des aérosols atmosphériques (les nuages, la poussière, la suie...) sur le climat.

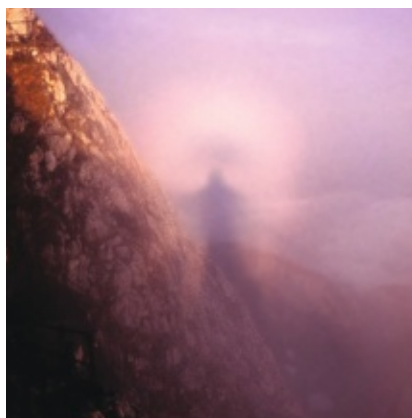
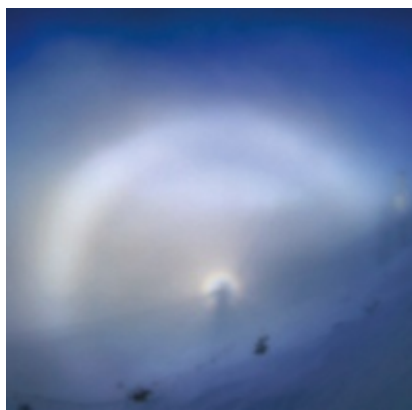
L'optique géométrique ne suffit pas

De nombreuses tentatives d'explication des gloires ont précédé la mienne. Toutes font appel à la diffraction de la lumière du Soleil par les gouttelettes des nuages : le terme de diffraction regroupe un ensemble de phénomènes portant sur la propagation de la lumière et résultant de sa nature ondulatoire ; on parle de diffraction dès que le comportement de la lumière viole les lois de l'optique géométrique, qui modélise sa propagation par des rayons rectilignes. Par exemple, dans certains cas, l'onde lumineuse pénètre dans des régions où devrait régner l'ombre d'un objet opaque, de la même façon qu'une vague contourne un pieu planté dans la mer. Dans d'autres cas où l'onde rencontre un objet, elle peut être éparpillée dans toutes les directions, concentrée dans certaines, divisée entre ses différentes composantes fréquentielles – donc en différentes couleurs, comme ce qui est observé lors des gloires –, etc.

L'optique géométrique ne pourrait-elle pas, elle aussi, expliquer les anneaux colorés des gloires ? Après tout, elle prévoit également un phénomène qui divise la lumière en ses différentes couleurs : la réfraction. Lorsque la lumière parvient à l'interface de deux milieux différents, tels que l'eau et l'air, une partie est réfléchiée et l'autre est réfractée. Dans la réfraction, la lumière traverse l'interface, mais sa trajectoire est déviée lorsqu'elle ne lui est pas perpendiculaire (la réfraction explique ainsi qu'un crayon à moitié plongé dans l'eau semble cassé) ; en outre, l'angle de déviation dépend de la longueur d'onde, de sorte que la lumière est séparée en ses différentes composantes fréquentielles.

Toutefois, un indice suggérerait que ce phénomène ne suffirait pas à expliquer

Steve Jurvetson



2. DES GLOIRES apparaissent parfois autour des ombres des alpinistes projetées sur la brume ou sur des nuages proches.

les gloires : s'il s'agissait de réfraction, les longueurs d'onde les plus élevées seraient les moins déviées, de sorte que le rouge devrait être à l'intérieur de chacun des « arcs-en-ciel » qui composent la gloire ; or le rouge est à l'extérieur. À l'inverse, la diffraction entraîne une déviation des ondes selon un angle croissant avec la longueur d'onde, ce qui correspond aux observations. Il fallait donc aller au-delà de l'optique géométrique et prendre en compte plus précisément la nature ondulatoire de la lumière, notamment à travers la diffraction.

Au début du XX^e siècle, le physicien allemand Gustav Mie a obtenu une expression exacte caractérisant la diffraction de la lumière par des gouttelettes sphériques ; il s'agit d'une solution particulière des équations de Maxwell, qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques. Le problème est que son expression comporte une somme infinie de termes nommés harmoniques sphériques. Chacun d'entre eux est une fonction compliquée, qui dépend notamment de la taille de la gouttelette, de l'indice de réfraction de l'eau (qui détermine la déviation des rayons lumineux par l'eau, comparative-ment au vide ou à l'air) et de la distance d'un rayon lumineux vis-à-vis du centre de la gouttelette (on parle de paramètre d'impact du rayon). Et bien que seul un nombre fini de ces termes importe en pratique, la méthode de Mie nécessite d'évaluer des centaines, voire des milliers, d'expressions mathématiques compliquées. Intégrez ces formules dans un calcul numérique fait par un puissant ordinateur et vous obtiendrez le bon résultat, mais vous n'aurez aucun élément sur l'explication physique du phénomène.

Une boîte noire mathématique

La solution de Mie n'est qu'une « boîte noire » mathématique qui, en fonction de certaines données d'entrée, produit un résultat. On attribue à Eugene Wigner, lauréat du prix Nobel de physique en 1963, cette remarque pertinente à propos des simulations et calculs numériques : « Bon, d'accord, l'ordinateur a compris, mais moi j'aimerais bien comprendre aussi ! » En outre, dans le cas des gloires, la multiplicité des tailles des gouttelettes dans les nuages rend les calculs particulièrement ardu, et ce n'est que dans les années 1990 que les supercalculateurs ont fourni les premiers résultats fiables.

Une explication plus précise de la physique en jeu et du comportement des ondes lumineuses à l'origine des gloires, déjà nécessaire avant Mie, l'est donc restée après lui. Au début du XIX^e siècle, le physicien allemand Joseph von Fraunhofer a suggéré que les gloires résultent d'une double déviation de la lumière : après avoir pénétré dans les couches internes du nuage, elle y serait réfléchi, puis serait diffractée par les gouttelettes des couches traversées lors de son trajet retour. Fraunhofer s'inspirait d'un phénomène relatif à la Lune : lorsque des nuages la voilent, les couches successives de gouttelettes diffractent sa lumière et l'astre apparaît entouré d'une couronne de plusieurs couleurs.

En 1923, le physicien indien B. B. Ray réfuta cette proposition. Grâce à des expériences avec des nuages artificiels, il montra que les anneaux de la gloire sont directement issus de la couche externe du nuage.

Ray tenta alors d'expliquer le retour de la lumière dans la direction incidente à l'aide d'interactions avec une seule gouttelette. Selon lui, la gloire était créée par un mince faisceau lumineux qui passait par le centre de la gouttelette et se réfléchissait sur la face arrière – il pensait que les autres rayons étaient dispersés dans des directions différentes de l'incidente –, puis subissait une diffraction lors de son trajet retour à l'intérieur de la gouttelette.

Au milieu du XX^e siècle, le Hollandais Hendrick van de Hulst proposa une explication alternative. Il remarqua qu'un rayon de lumière qui pénètre dans une gouttelette selon une direction quasi rasante, c'est-à-dire proche de la tangente à la surface, pouvait repartir pratiquement dans la direction incidente ; le rayon est réfléchi à l'arrière de la gouttelette, avant de ressortir (voir l'encadré page ci-contre). En raison de la symétrie des gouttelettes sphériques, tous les rayons parallèles et ayant le même paramètre d'impact (ils forment un cylindre) subissent cette réflexion. Un effet de focalisation en résulte : les rayons réfléchis ne se dispersent pas dans toutes les directions, mais sont focalisés dans la direction d'incidence, ce qui renforce l'intensité lumineuse renvoyée dans cette direction.

L'explication semblait plausible, mais posait un problème. Un rayon qui pénètre dans un nouveau milieu, ici une gouttelette d'eau, et qui en ressort est plus ou moins dévié selon l'indice de réfraction de ce milieu. Or l'indice de réfraction de l'eau

ne permet pas de renvoyer un rayon dans la même direction après une seule réflexion interne. Au mieux, l'eau peut renvoyer la lumière dans une direction s'écartant de 14 degrés de celle du rayon incident.

Pour annuler cet écart angulaire, van de Hulst proposa en 1957 l'idée que la lumière incidente se transforme temporairement en une onde de surface (de telles ondes circulent à l'interface de deux milieux différents et apparaissent dans un grand nombre de situations), avant de pénétrer dans la gouttelette et d'en ressortir. Elle suivrait alors la paroi convexe de la gouttelette sur de courtes distances, et la trajectoire globale résultante aboutirait à un renvoi du rayon dans la direction incidente (*voir l'encadré ci-contre*).

La difficulté est que les ondes de surface perdent de l'énergie en se propageant. Mais pour van de Hulst, cette atténuation lumineuse était largement compensée par la focalisation axiale. À l'époque où il émit cette hypothèse, aucun procédé quantitatif ne permettait de le vérifier, de même qu'on ne pouvait pas évaluer la contribution des rayons décrits par Ray. Toute l'information nécessaire devait être implicitement contenue dans la série d'harmoniques sphériques de Mie; mais en 1957, personne ne savait l'extraire.

Une contribution inattendue

En 1987, avec Warren Wiscombe, du Centre de vols spatiaux de la NASA, à Greenbelt, aux États-Unis, j'ai proposé une nouvelle piste pour expliquer le phénomène des gloires. Nous avons suggéré que les rayons lumineux passant à l'extérieur de la goutte sphérique jouent un rôle important. À première vue, cela semble absurde: comment un rayon pourrait-il être influencé par une gouttelette s'il ne l'effleure même pas? Mais les ondes – et les ondes lumineuses en particulier – ont l'étrange capacité d'enjamber une barrière *a priori* infranchissable: c'est « l'effet tunnel », une autre manifestation de la diffraction subie par une onde.

Ainsi, dans certaines circonstances, l'énergie lumineuse peut s'échapper d'un milieu où elle devrait rester confinée. Examinons de quelle façon. En règle générale, la lumière se propageant dans un milieu tel que le verre ou l'eau est totalement réfléchie si elle heurte, avec un angle assez petit, la surface qui la sépare d'un autre milieu

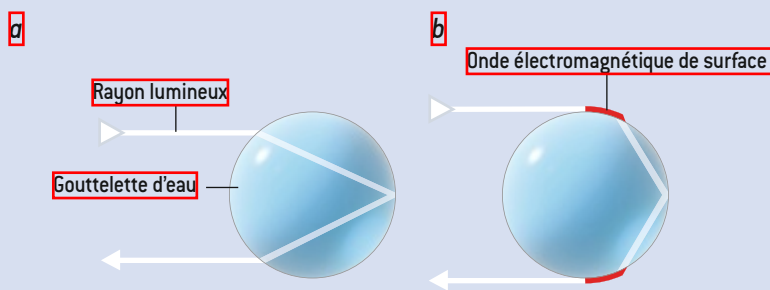
LA LUMIÈRE AU BOUT DU TUNNEL

Le phénomène des gloires est connu depuis des siècles, mais les physiciens ne l'ont compris que récemment, et après quelques errements, grâce notamment à ce que l'on nomme l'effet tunnel.

De fausses pistes...

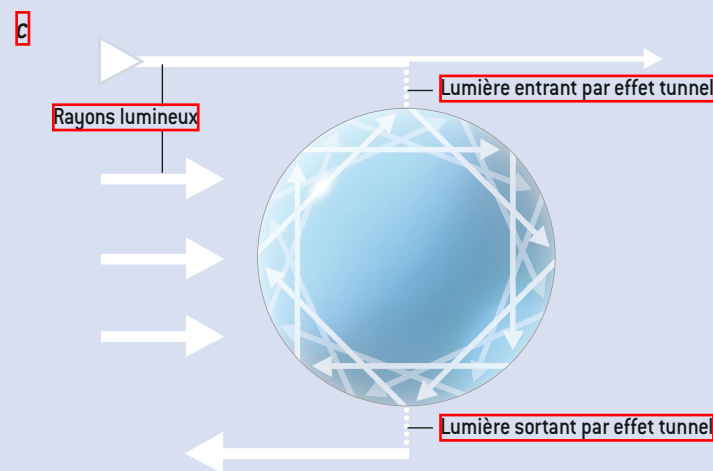
Les chercheurs ont d'abord attribué ce phénomène à la réflexion de la lumière à l'intérieur des minuscules gouttelettes d'eau qui composent les nuages. Les rayons auraient été déviés en pénétrant dans la gouttelette (c'est la réfraction), se seraient réfléchis à l'intérieur, puis auraient été de nouveau déviés en ressortant, de façon à revenir à la direction initiale, dans le sens opposé (a). Mais l'eau n'a pas le pouvoir de dévier suffisamment les rayons lumineux pour qu'ils repartent exactement dans la même direction.

Une deuxième théorie a alors postulé que les rayons lumineux effleurant une gouttelette se transforment temporairement en ondes électromagnétiques de surface. En suivant la surface convexe sur une petite distance (*exagérée sur la figure b*) avant de pénétrer dans la gouttelette et d'en ressortir, le rayon peut tourner de façon à être renvoyé dans la direction initiale. Cet effet existe, mais il ne contribue que pour une petite part à l'énergie globale perçue dans une gloire.



... et finalement la solution !

Au début du XX^e siècle, on a décrit le phénomène des gloires à l'aide d'une expression mathématique compliquée, qui n'en autorisait pas une réelle compréhension physique. C'est à une telle compréhension qu'est parvenu l'auteur: il a montré que la principale partie de la lumière perçue dans une gloire résulte du passage par effet tunnel, à l'intérieur des gouttelettes d'eau, d'une partie de l'énergie des ondes lumineuses associées à des rayons qui frôlent les gouttelettes (c). L'effet tunnel se produit avec les ondes de toutes sortes, qu'elles relèvent de la physique quantique ou classique.



dont l'indice de réfraction est inférieur – c'est notamment ce qui permet de maintenir un signal dans une fibre optique, le rayon lumineux se réfléchissant sur les parois. Néanmoins, même si toute l'énergie lumineuse est réfléchie, les champs électriques et magnétiques qui composent les ondes ne s'annulent pas complètement à l'interface. Ils pénètrent dans le deuxième milieu sur une infime distance, formant des ondes dites évanescentes qui ne se propagent pas en dehors de la proximité immédiate de l'interface et ne transportent aucune énergie à travers cette frontière.

Dans ce dernier cas, l'effet tunnel n'intervient pas. En revanche, quand un troisième milieu matériel se trouve à très courte distance de la frontière, de sorte qu'il empiète sur le terrain des ondes évanescentes, la lumière peut reprendre sa propagation externe dans ce troisième milieu ; son énergie est alors « siphonnée » à travers la brèche ouverte par les ondes évanescentes. En conséquence, l'onde d'origine

s'affaiblit. L'effet tunnel permet ainsi de traverser un milieu qui formait auparavant une barrière. Notons qu'un effet tunnel notable ne peut se produire que si l'espace entre les milieux de départ et d'arrivée n'est pas beaucoup plus grand qu'une longueur d'onde – environ un demi-micromètre dans le cas de la lumière visible.

Newton avait observé ce phénomène dès 1675. Il étudiait alors des figures d'interférences, connues aujourd'hui sous le nom d'anneaux de Newton : lorsqu'une lentille convexe est posée sur une lame de verre plane, une série d'anneaux concentriques, alternativement clairs et sombres, apparaît autour du point de contact ; on observe cette figure aussi bien en regardant la lame de dessous – par transparence – que de dessus. Lorsque la lentille et la lame sont séparées par une infime barrière d'air, la figure d'interférences vue du dessous est perturbée ; Newton a montré que les perturbations venaient d'une petite quantité de lumière qui arrive de

façon rasante sur la face convexe de la lentille et franchit la barrière d'air au lieu d'être réfléchie.

L'effet tunnel n'a rien d'intuitif. Le physicien d'origine russe George Gamow fut le premier à l'utiliser en mécanique quantique en 1928 pour expliquer comment certains isotopes radioactifs émettent des particules alpha (assemblages de deux protons et deux neutrons). Gamow remarqua que ces particules n'avaient pas assez d'énergie pour échapper à l'attraction du noyau, un peu comme un boulet de canon ne peut se détacher du champ gravitationnel de la Terre. Mais il a démontré que leur nature ondulatoire (en physique quantique, la dualité onde-particule implique que toute particule a aussi des propriétés ondulatoires) entraînait un effet tunnel grâce auquel elles se libéraient.

Contrairement aux idées reçues, l'effet tunnel n'est pas exclusivement un phénomène quantique. Il se produit aussi avec des ondes classiques. Ainsi, dans un nuage, une partie de la lumière du Soleil qui devrait passer à proximité immédiate d'une gouttelette d'eau peut y pénétrer par effet tunnel et, de cette façon, contribuer à la production d'une gloire.

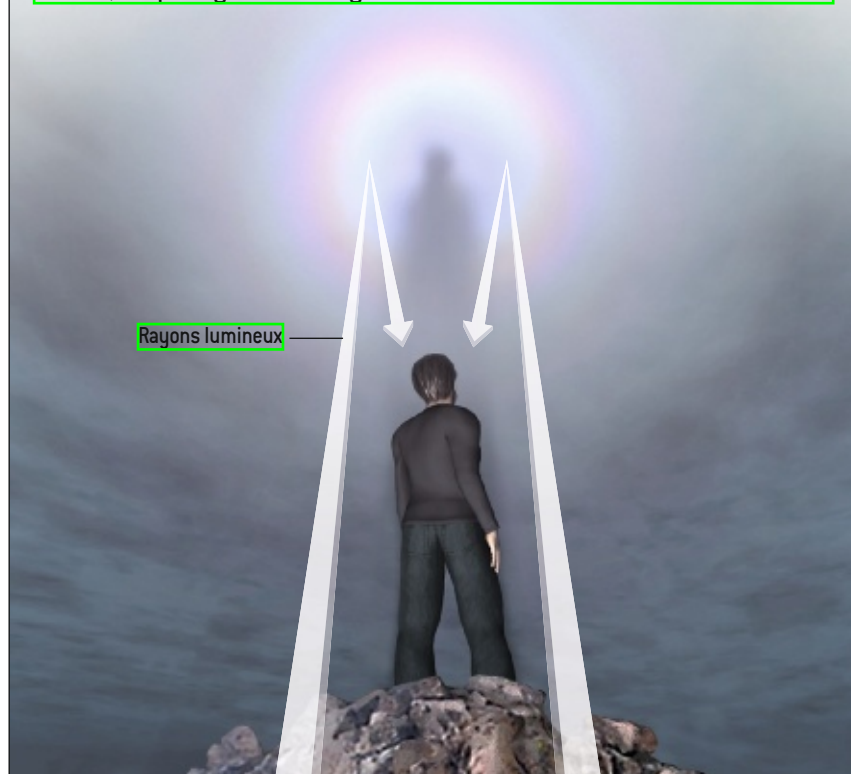
Lors de nos premiers travaux en 1987, W. Wiscombe et moi avons étudié la diffraction par une sphère totalement réfléchissante, telle une boule argentée. Nous avons découvert que des rayons qui devraient passer à côté de la sphère peuvent, s'ils en sont assez proches, traverser par effet tunnel la couche d'air qui les en sépare et contribuer notablement à la diffraction.

Dans le cas d'une bille transparente telle qu'une gouttelette d'eau, l'onde peut se propager à l'intérieur après avoir effectué cette traversée. Une fois entrée dans la gouttelette, l'onde heurte sa surface interne sous un angle assez faible pour être réfléchie totalement et y rester piégée. Le même phénomène se produit parfois avec des ondes sonores. Par exemple, à Londres, la coupole de la cathédrale Saint-Paul abrite une galerie circulaire aux propriétés acoustiques étonnantes : une personne qui chuchote près de la paroi peut être entendue distinctement depuis le côté opposé, à plus de 34 mètres de distance, grâce aux multiples réflexions du son sur les murs concaves.

Revenons aux ondes lumineuses piégées dans la gouttelette. Des interférences constructives renforcent certaines

POURQUOI DES GLOIRES AUTOUR DES OMBRES ?

Une gloire étant constituée de lumière renvoyée quasiment dans la direction d'où elle vient, le phénomène requiert l'alignement du Soleil, de l'observateur et du nuage. C'est pourquoi elle est toujours perçue comme un halo entourant l'ombre de l'observateur projetée sur le nuage. Comme pour un arc-en-ciel, les diverses couleurs du spectre subissent des déviations d'angles légèrement différents, ce qui engendre une figure irisée.



composantes fréquentielles de l'onde lors des multiples réflexions internes. Elles produisent ce qu'on nomme une «résonance de Mie» – on parle aussi de résonances en mode de chuchotement en galerie, par analogie avec l'acoustique. De même, quand on synchronise les poussées communiquées à une balançoire sur le rythme précis de son mouvement pendulaire naturel, la balançoire s'élève de plus en plus haut. Les résonances de Mie sont très localisées en longueur d'onde et augmentent l'intensité lumineuse de façon importante.

Si les ondes piégées dans la gouttelette contribuent au phénomène de la gloire, cela signifie qu'elles finissent par en ressortir, mais comment ? De la même façon qu'elles y sont entrées : par effet tunnel.

En résumé, trois contributeurs potentiels pouvaient expliquer les gloires : les rayons qui heurtent « frontalement » la gouttelette et sont renvoyés dans la direction incidente ; les rayons rasants qui y pénètrent *via* les ondes de surface de van der Hulst ; et les rayons qui entrent et ressortent par effet tunnel, dopés au passage par des résonances de Mie.

Grâce à divers traitements mathématiques de l'expression établie par Mie, j'ai évalué ces trois contributions : la première en 1969, la deuxième en 1977 avec Vijay Khare, alors chercheur à l'Université de Rochester, aux États-Unis, et la troisième en 1994, avec Luiz Gallisa Guimarães, de l'Université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil. En 2002, j'ai entrepris des analyses précises pour déterminer laquelle prédomine. J'en ai conclu que la contribution essentielle provient des rayons introduits par effet tunnel et ayant subi des résonances de Mie. Les gloires sont donc une manifestation macroscopique d'un effet tunnel subi par la lumière.

Des gloires au climat

Outre la satisfaction intellectuelle d'avoir enfin compris le principe des gloires, nos recherches pourraient avoir d'importantes applications. Désormais, nous connaissons mieux les résonances de Mie, notamment exploitées par certains lasers utilisant des microgouttelettes d'eau et des microsphères solides. De plus, la compréhension de la diffraction par des gouttelettes est capitale pour évaluer le rôle que les nuages auront dans le changement climatique.

En effet, l'eau est transparente dans le domaine visible, mais, à l'instar du gaz carbonique et d'autres gaz à effet de serre, elle absorbe certaines longueurs d'onde dans l'infrarouge. Et comme les résonances de Mie impliquent généralement d'innombrables réflexions internes, et donc de longues trajectoires à l'intérieur des gouttelettes, il est possible qu'une minuscule gouttelette absorbe une quantité importante de rayonnement, surtout si l'eau contient des polluants qui l'assombrissent. L'évolution de la couche nuageuse moyenne – qui reste à préciser – contribuera-t-elle alors au réchauffement de la Terre en piégeant les rayons infrarouges ? Ou préservera-t-elle au contraire la fraîcheur de la planète en réfléchissant

LA CONTRIBUTION ESSENTIELLE PROVIENT des rayons introduits dans la gouttelette par effet tunnel et ayant subi des résonances de Mie.

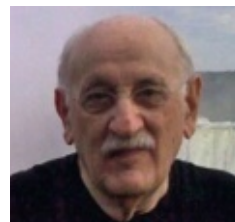
davantage la lumière du Soleil et en la renvoyant dans l'espace ? On l'ignore encore.

Nous avons tout de même progressé. Plusieurs simulations de la diffusion de la lumière par les nuages ont été réalisées depuis une dizaine d'années. L'expression mathématique établie par Mie a ainsi été calculée pour un petit nombre de diamètres de gouttelettes, que l'on pensait représentatifs.

Cette restriction a réduit le temps de calcul, mais reste problématique. Comme je l'ai montré en 2003, elle peut entraîner des erreurs allant jusqu'à 30 pour cent sur la quantité de lumière absorbée par les nuages dans des bandes étroites du spectre. En outre, elle risque de masquer des phénomènes importants tels que des résonances : par exemple, si on effectue les calculs pour des gouttelettes de un, deux, trois, etc., micromètres, on peut manquer une résonance à 2,4 micromètres. Le peu de précisions de ces simulations a été confirmé en 2006 par une étude qui a pris en compte la répartition des tailles de gouttelettes dans l'atmosphère. Ces dernières années, les modèles ont été actualisés pour inclure des incréments de taille de gouttelettes plus petits.

Wigner l'avait noté : des résultats, même issus de supercalculateurs de dernière génération, sont inutiles sans une compréhension physique du phénomène. À méditer, peut-être, la prochaine fois que vous prendrez place près d'un hublot. ■

L'AUTEUR



Moysés NUSSENZVEIG est professeur émérite de physique de l'Université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil. Il a reçu le prix Max Born de la Société américaine d'optique en 1986.

BIBLIOGRAPHIE

H. M. Nussenzveig, *Light tunneling*, *Progress in Optics*, vol. 50 (éd. E. Wolf), Elsevier, 2007.

C. S. Zender et J. Talamantes, *Solar absorption by Mie resonances in cloud droplets*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 98(1), pp. 122-129, 2006.

H. M. Nussenzveig, *Light tunneling in clouds*, *Applied Optics*, vol. 42(9), pp. 1588-1593, 2003.

H. M. Nussenzveig, *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*, Cambridge University Press, 1992.

MUCOVISCIDOSE

À la recherche des mutations génétiques en cause

Steven Rowe, John Clancy et Eric Sorscher

Une meilleure compréhension des mécanismes biologiques responsables de la mucoviscidose devrait aboutir à la mise au point de nouveaux médicaments.

L'ESSENTIEL

✓ La mucoviscidose est une maladie héréditaire grave, la sécrétion d'un mucus épais entraînant des difficultés respiratoires et digestives.

✓ Le gène codant la protéine CFTR, impliquée dans la régulation des ions chlore, est muté.

✓ Plusieurs mutations ont été identifiées, ce qui explique que la maladie est plus ou moins grave.

✓ De nouveaux traitements visant à compenser les anomalies de la protéine CFTR sont en cours d'essais cliniques.

En 1989, les scientifiques ont découvert le gène responsable de la mucoviscidose, une maladie souvent grave, qui touche plus de 70 000 personnes dans le monde dont 5 000 à 6 000 en France. Avec l'identification du gène, il semblait qu'un traitement, attendu depuis longtemps, allait bientôt être disponible. La version normale du gène, introduite dans l'organisme du malade, devait produire des protéines fonctionnelles. L'espoir était grand pour les malades souffrant de mucoviscidose, qui décédaient en général avant d'avoir 30 ans. Aujourd'hui, ce seuil fatal a été repoussé d'une dizaine d'années pour la moitié des malades. Restait une question cruciale : les généticiens seraient-ils capables d'insérer de façon fiable le gène normal dans l'organisme des malades ?

La tâche se révéla plus compliquée que prévu. Bien que les généticiens aient réussi à construire des virus pour transporter des copies du gène « thérapeutique » dans les cellules des malades, les virus étaient peu efficaces et rapidement détruits par le système immunitaire du malade. À la fin des années 1990, on dut se rendre à l'évi-





1. LE POUMON D'UNE PERSONNE ATTEINTE DE MUCOVISCIDOSE contient un mucus épais (à gauche), ce qui n'est pas le cas dans un poumon normal (à droite). Ce mucus visqueux perturbe la respiration et favorise les infections pulmonaires.

dence : il fallait trouver une autre approche pour vaincre la mucoviscidose.

Simultanément, les biologistes cellulaires avaient entrepris de déterminer les caractéristiques de la protéine normale, comment elle fonctionne et ce qui cause les symptômes de la mucoviscidose. Ils ont cherché à déterminer la structure tridimensionnelle de la protéine, et pourquoi la protéine anormale ne remplit pas ses fonctions. Au lieu de créer des protéines normales en remplaçant le gène muté par le gène fonctionnel – comme on le ferait avec la thérapie génique –, les biologistes se sont fixé un objectif différent : trouver un médicament améliorant le fonctionnement de la protéine défectueuse. Ce faisant, on ne guérirait pas les malades, mais on leur permettrait de vivre plus longtemps et en meilleure santé.

Aujourd'hui, grâce à une compréhension plus précise de la maladie, plusieurs nouveaux composés sont en phase finale d'essais cliniques, et l'un d'entre eux semble prometteur pour certains malades. En cas de succès, il serait le premier médicament qui s'attaque à la cause de la mucoviscidose, au lieu d'en traiter les symptômes. Par ailleurs, des études préliminaires indiquent que ces nouveaux traitements potentiels agissent aussi contre des maladies plus communes, telles la bronchite, la sinusite chronique et la pancréatite.

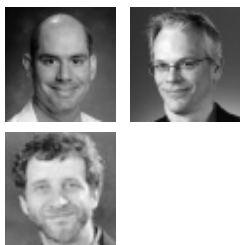
Une anomalie du transport du sel

Les biologistes ont d'abord cherché à comprendre quel mécanisme biologique est en cause dans la mucoviscidose. Ils savaient depuis longtemps que la maladie résulte d'une anomalie du transport du sel (le chlorure de sodium) à travers les membranes cellulaires. Normalement, une molécule nommée canal chlore régule le flux des ions chlore qui entrent et sortent des cellules. Quand des ions quittent une cellule pour s'accumuler dans le milieu extracellulaire, des molécules d'eau diffusent vers l'extérieur des cellules, de sorte que les concentrations de ces ions s'écartent peu de leur valeur moyenne.

Or le gène responsable de la mucoviscidose code un canal chlore, nommé régulateur de la conductance transmembranaire de la mucoviscidose ou CFTR (*Cystic Fibrosis Transmembrane conductance Regulator*). Cette protéine, de quelque 1 500 acides aminés, se replie en une structure complexe, composée d'un assemblage

JOHN HENNIG

L'AUTEUR



Steven ROWE est maître de conférences en pneumologie pédiatrique, physiologie et biophysique à l'Université de l'Alabama, aux États-Unis.

John CLANCY est professeur de pneumologie pédiatrique à l'Hôpital pour enfants de Cincinnati et à l'Université de Cincinnati, aux États-Unis.

Eric SORSCHER est professeur de médecine, physiologie et biophysique à l'Université de l'Alabama.

tridimensionnel de boucles et de feuillets, qui s'organisent en spirales formant plusieurs sous-sections. Quand le canal CFTR est fonctionnel, les mouvements des ions chlore s'accompagnent d'un flux d'eau qui fluidifie le mucus tapissant les voies respiratoires. C'est aussi le cas dans les intestins, le pancréas et le foie, le canal CFTR pouvant également réguler le flux d'autres ions, tels que les ions bicarbonate.

Chez les malades atteints de mucoviscidose, le gène CFTR est muté, de sorte que le canal ne fonctionne pas correctement. Dès lors, les ions chlore – et surtout l'eau – restent piégés dans les cellules, si bien que le mucus n'est pas fluidifié : c'est ce mucus déshydraté et épais qui perturbe divers mécanismes physiologiques. Dans les poumons, l'obstruction des voies aériennes par le mucus, qui ressemble à un gel, perturbe la diffusion de l'oxygène dans les sacs alvéolaires et transforme la respiration en une « tentative de respirer avec les mains de quelqu'un plaquées sur le visage », comme l'a décrit un de nos jeunes patients. De surcroît, le mucus visqueux favorise les infections bactériennes graves,

ments ont été développés pour libérer les voies aériennes, lutter contre les infections ou fluidifier les sécrétions pulmonaires. Un apport complémentaire en vitamines et en enzymes améliore la digestion. C'est notamment grâce à ces mesures que la moitié des patients atteints de mucoviscidose vivent aujourd'hui jusqu'à 37 ans, voire davantage. Aucun de ces traitements ne s'attaque cependant à la cause de la maladie : le flux insuffisant des ions chlore et d'autres ions vers l'extérieur des cellules.

Trois principaux types de mutations

Pour rétablir ne serait-ce que partiellement les fonctions d'un canal chlore, il faut d'abord identifier ses anomalies. En testant des échantillons d'ADN de malades du monde entier, les généticiens ont découvert plus de 1 600 mutations différentes dans le gène CFTR responsable d'une forme grave de la maladie. Les conséquences sur la protéine CFTR se répartissent en plusieurs groupes. Dans les trois groupes les mieux étudiés, le canal synthétisé est tronqué, il ne se met jamais en place dans la membrane cellulaire, ou il a une forme normale, mais est incapable de s'ouvrir et d'assurer le transport des ions chlore. Un médicament compensant l'une des trois anomalies serait inefficace pour les deux autres. Par conséquent, il est vraisemblable que, pour soulager tous les malades atteints de mucoviscidose, il sera nécessaire de développer différents médicaments, chacun visant à compenser les conséquences d'un type des mutations génétiques responsables de la maladie.

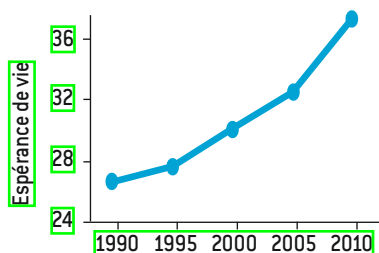
Le premier groupe de mutations responsables de la mucoviscidose, représentant environ dix pour cent des cas dans le monde, donne naissance à des canaux CFTR anormalement courts. L'un de ces défauts génétiques – W1282X – est responsable de près de 40 pour cent des cas de mucoviscidose en Israël. La protéine est tronquée, parce que le gène contient des informations erronées, qui commandent à la machinerie de la synthèse protéique d'arrêter d'allonger la molécule, à la position 1282 de la chaîne normalement occupée par un acide aminé tryptophane (noté W). De telles instructions génétiques dites codons non sens sont essentielles pour la fabrication des protéines, à condition qu'elles se trouvent à la bonne place. Dans le cas présent, un codon non sens interrompt la

LA CELLULE EST PARFOIS CAPABLE DE PRODUIRE

un canal chlore fonctionnel, mais le système de « contrôle qualité » de la cellule l'empêche d'agir.

par le bacille pyocyanique par exemple. Dans le pancréas, les sécrétions épaisses et immobiles empêchent le passage des enzymes digestives vers les intestins. Cela perturbe la digestion, au point que les personnes atteintes de mucoviscidose sont souvent maigres ou sous-alimentées. Dans le foie, la bile stagne, de sorte que les graisses sont mal transformées, et des blocages dans les intestins entraînent une constipation chronique, voire une occlusion du tube digestif, parfois fatale.

Avant l'utilisation des antibiotiques pour le traitement des infections pulmonaires récurrentes et la découverte d'une meilleure prise en charge nutritionnelle, la plupart des malades atteints de mucoviscidose décédaient durant l'enfance. Au cours des dernières décennies, les progrès ont prolongé la vie des malades. Certains traitements peuvent paraître barbares : les parents ou les soignants apprennent comment faire vibrer la poitrine de l'enfant pour faire progresser les sécrétions épaisses dans les poumons et déloger les bouchons de mucus. Plusieurs médica-



2. L'ESPÉRANCE DE VIE des malades s'est allongée grâce à un dépistage précoce et à des traitements efficaces (des antibiotiques essentiellement) contre les infections et les autres symptômes de la mucoviscidose.

synthèse prématurément. De surcroît, les molécules intermédiaires (des ARN messagers), qui servent de guide au processus de production des protéines, sont aussi reconnues comme étant anormales et sont détruites : même si l'on parvenait à museler le codon non sens, la quantité de protéines synthétisées serait insuffisante. Dès lors, un médicament luttant contre la mutation W1282X devrait, d'une part, empêcher la destruction des ARN messagers et, d'autre part, empêcher l'arrêt de la synthèse protéique.

La mutation génétique la plus fréquente, à l'origine de la plupart des cas de mucoviscidose, entraîne une absence totale de canal chlore à la surface des cellules. Cette mutation aboutit à l'absence (ou délétion) d'un des 1 500 acides aminés qui constituent le canal. L'acide aminé manquant

est la phénylalanine – notée F –, le 508^e acide aminé de la chaîne ; la mutation porte le nom de F508del (del pour délétion).

Malgré la mutation, la cellule est capable de produire un canal chlore à peu près fonctionnel, mais le système moléculaire de « contrôle qualité » de la cellule l'empêche d'agir. La cellule dispose de plusieurs centaines de protéines et d'enzymes qui transportent les protéines CFTR tout juste synthétisées dans la cellule, vérifient la façon dont elles se replient et aident à leur insertion dans la membrane. Des défauts, même mineurs, telle l'omission de l'acide aminé F508, peuvent être rapidement détectés et la protéine est détruite. Dès lors, un canal chlore anormal – même partiellement fonctionnel – n'atteint jamais la membrane cellulaire.

✓ SUR LE WEB

www.mucoviscidose-cftr.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. M. Rowe et al., *Cystic fibrosis*, *New England Journal of Medicine*, vol. 352, pp. 1992-2001, 2005.

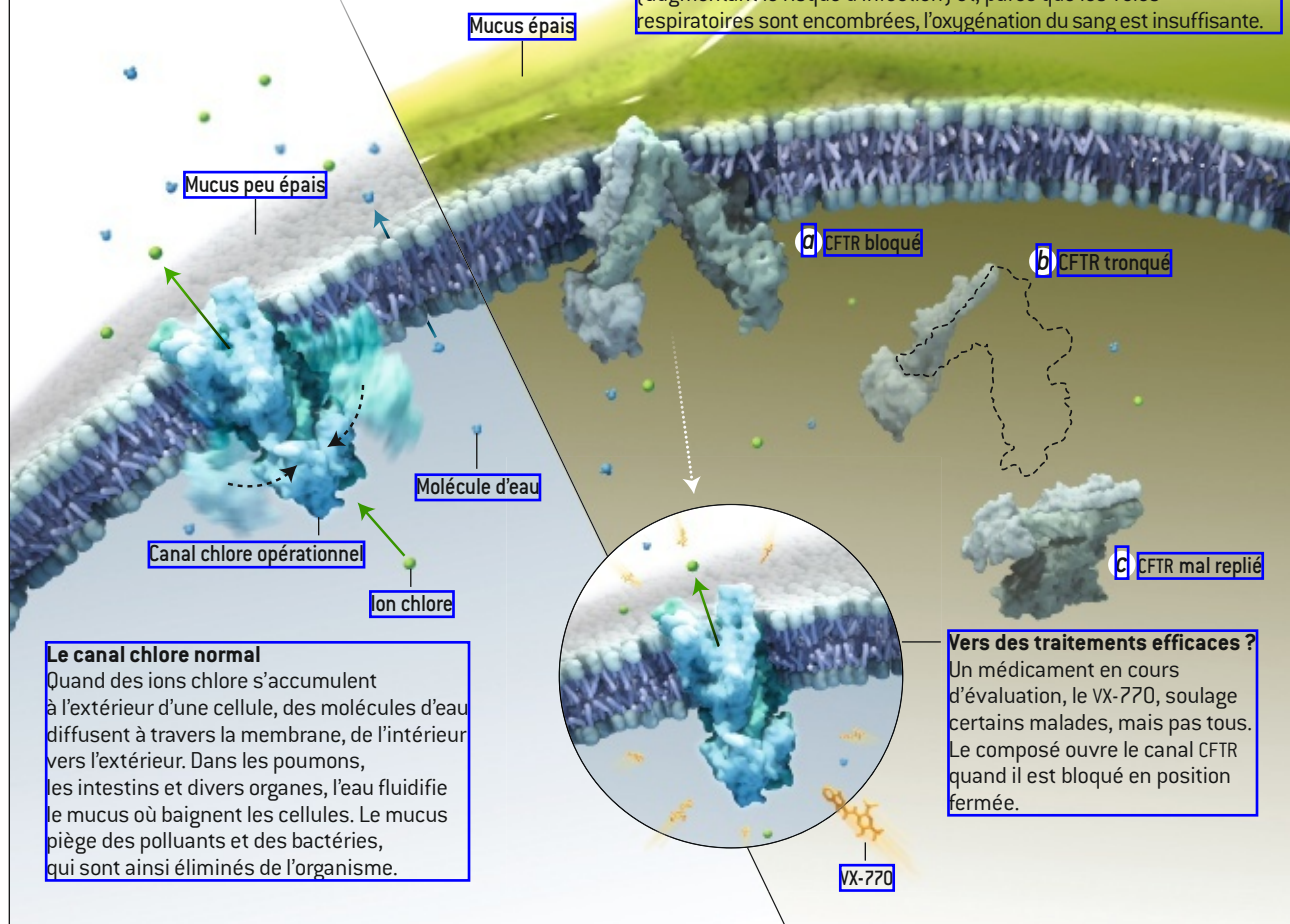
M. Cohen-Cymberknoh et al., *Managing cystic fibrosis : strategies that increase life expectancy and improve quality of life*, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 183, n° 11, pp. 1463-1471, 2011.

LES ANOMALIES DU CANAL CHLORE

Des échanges d'ions chlore ont sans cesse lieu entre l'intérieur et l'extérieur des cellules. Ces ions traversent la membrane par le canal CFTR. Des mutations dans le gène codant ce canal sont responsables de la mucoviscidose.

Le canal chlore anormal

Les mutations dans le gène causant la mucoviscidose provoquent différentes formes de la maladie. Certaines aboutissent à la production de canaux CFTR fermés en permanence (a), tronqués (b) ou mal repliés (c). Le flux des ions chlore et celui de l'eau sont réduits, de sorte que le mucus est anormalement épais : au lieu d'être entraînées et éliminées, les bactéries sont piégées sur place (augmentant le risque d'infection) et, parce que les voies respiratoires sont encombrées, l'oxygénation du sang est insuffisante.



Le canal chlore normal

Quand des ions chlore s'accumulent à l'extérieur d'une cellule, des molécules d'eau diffusent à travers la membrane, de l'intérieur vers l'extérieur. Dans les poumons, les intestins et divers organes, l'eau fluidifie le mucus où baignent les cellules. Le mucus piège des polluants et des bactéries, qui sont ainsi éliminés de l'organisme.

Vers des traitements efficaces ?

Un médicament en cours d'évaluation, le VX-770, soulage certains malades, mais pas tous. Le composé ouvre le canal CFTR quand il est bloqué en position fermée.

DANS Biomédical Animation Studio

Signes cliniques et prise en charge de la mucoviscidose

Les manifestations cliniques de la mucoviscidose sont multiples et variables d'un patient à l'autre, car les mutations qui perturbent le fonctionnement de la protéine CFTR impliquée dans la maladie sont elles-mêmes nombreuses (plus de 1 600). Elles ont des répercussions plus ou moins graves sur le fonctionnement des systèmes respiratoire et digestif.

Quelles sont les manifestations cliniques de la mucoviscidose et comment diagnostique-t-on la maladie ? En France, le dépistage néonatal de la mucoviscidose est obligatoire depuis 2002. Il est réalisé par le test de Guthrie : on prélève quelques gouttes de sang au niveau du talon chez le nourrisson âgé de quatre jours, ce qui peut révéler un fonctionnement anormal du pancréas. En cas de test positif, on pratique le test à la sueur qui indique si la concentration en chlorure de sodium est trop élevée. On sait qu'un tel excès est caractéristique des formes graves de la

maladie. Si les résultats de ces deux tests sont positifs, un troisième est réalisé. Il s'agit d'un diagnostic moléculaire fondé sur la détection de mutations du gène CFTR par un kit permettant de dépister les 20 à 30 mutations les plus fréquentes. Enfin, un autre signe peut alerter le médecin vers un diagnostic de mucoviscidose : la rétention des toutes premières selles dans l'intestin, qui survient chez 10 à 20 pour cent des nouveau-nés. Cette obstruction indique une mauvaise hydratation des selles. Or une mauvaise hydratation des selles ou du mucus qui tapisse les voies respiratoires résulte des mutations de la protéine CFTR.

La pathologie pulmonaire survient après quelques mois de vie et est caractérisée par des infections microbiennes chroniques entrecoupées d'épisodes aigus, par divers agents pathogènes dont le principal est *Pseudomonas aeruginosa*. Les difficultés à expirer et les expectorations puru-

lentes associées à un état infectieux et inflammatoire conduisent de façon progressive, mais inéluctable, à une insuffisance respiratoire détruisant le tissu pulmonaire. On observe aussi une insuffisance pancréatique entraînant un défaut d'absorption des graisses, des protéines et des vitamines liposolubles. Chez 50 pour cent des adultes et 20 pour cent des jeunes, un diabète insulino-dépendant aggrave la pathologie digestive. Enfin, chez six à dix pour cent des sujets, on diagnostique des atteintes du foie accentuant encore la gravité de la maladie. Toutefois, tous ces troubles sont plus ou moins graves, ce qui permet de définir deux groupes (phénotypes) de patients : un sévère (avec insuffisance pancréatique) et un modéré (sans insuffisance pancréatique).

Pourtant, la prise en charge est aujourd'hui plus précoce et mieux adaptée, de sorte que l'espérance de vie des personnes atteintes de mucoviscidose a notablement aug-

menté, même pour les formes graves (10 ans en moyenne dans les années 1960 et 40 ans aujourd'hui). C'est l'utilisation mieux maîtrisée des antibiotiques, de la kinésithérapie respiratoire pour les plus jeunes, des compléments nutritionnels, sans oublier les progrès importants des techniques de transplantations pulmonaires, qui a permis ce résultat. La découverte des mutations et de leurs conséquences devrait encore améliorer l'espérance de vie de ces malades. En revanche, les médecins sont confrontés à des manifestations de la maladie spécifiques de l'âge adulte qui n'étaient pas connues avant (puisque les malades n'atteignaient pas cet âge) : par exemple la stérilité quasi systématique des hommes portant la mutation F508del et le mauvais fonctionnement du foie.

Frédéric Becq

Institut de physiologie et biologie cellulaires de l'Université de Poitiers

La mutation située en position 508 étant la cause la plus fréquente de la mucoviscidose, de nombreux laboratoires, dont le nôtre, essaient de localiser les points de contrôle cellulaire où la molécule F508del est disqualifiée et recyclée. Les biochimistes espèrent ainsi découvrir des composés qui éviteraient la destruction de la protéine sans interférer avec la capacité des cellules à reconnaître et éliminer d'autres chaînes d'acides aminés incorrectes.

Comprendre comment ajuster ces systèmes de contrôle qualité présenterait un avantage au-delà du traitement de la mucoviscidose. Plusieurs maladies chroniques, tels certains dysfonctionnements du métabolisme du cholestérol et des maladies pulmonaires héréditaires (parmi lesquelles le déficit en alpha 1-antitrypsine), résultent d'un repliement incorrect d'une protéine. Au moins dans certaines maladies, il devient de plus en plus évident que le vrai coupable n'est pas la fonction altérée de la protéine en soi, mais plutôt la propension du mécanisme de contrôle qualité à dégrader la molécule anormale ou à la piéger dans un amas intriqué de molécules. Il est vraisemblable qu'un certain nombre de protéines, même mal repliées, resteraient fonctionnelles à condition qu'elles soient épargnées et puissent assurer leur tâche. Des thérapies qui s'attaqueraient au contrôle qualité permettraient de traiter une vaste gamme de maladies.

Le dernier ensemble de mutations que nous examinerons ici représente environ cinq pour cent des cas de mucoviscidose dans le monde. Ces mutations main-

tiennent le canal en position fermée : le passage des ions chlore vers l'extérieur de la cellule est bloqué.

Bien que chaque groupe d'anomalies génétiques nécessite un traitement spécifique, des chercheurs ont montré que certains composés conçus pour maintenir ouvert un canal CFTR muté pourraient aider des malades atteints de mucoviscidose qui ne portent pas cette mutation. Prenons par exemple le cas d'un médicament qui permettrait à de petites quantités de CFTR F508del d'atteindre la membrane cellulaire. Un second médicament maintenant le canal ouvert permettrait à cette version du canal un peu lente de laisser sortir plus d'ions chlore de la cellule.

Des candidats médicaments prometteurs

On a ensuite recherché des composés capables de réduire les conséquences des mutations du gène CFTR. Il était logique de commencer par F508del, en raison de sa forte prévalence chez les malades atteints de mucoviscidose et parce que la protéine reste en partie fonctionnelle. Comme nous l'avons évoqué, si l'on évitait la dégradation prématurée de la protéine CFTR F508del, la fonction respiratoire devrait être améliorée.

Les repliements anormaux de la protéine CFTR F508del et les mécanismes de détection des défauts par la machinerie cellulaire du contrôle qualité sont encore mal connus. Toutefois, on sait reconnaître si

un composé permet de contrecarrer les effets d'une erreur de repliement.

En introduisant des molécules fluorescentes dans une cellule, les chercheurs peuvent visualiser les flux à travers les canaux chlore de la membrane. Ils peuvent aussi observer si le canal CFTR défectueux récupère une certaine activité en présence de telle ou telle substance testée. En automatisant et en informatisant ce processus, on peut tester des millions de composés en peu de temps.

La société de biotechnologie *Vertex Pharmaceuticals* a identifié un composé, nommé VX-809, qui a donné des résultats préliminaires encourageants ; mais ce produit n'a pas amélioré la fonction pulmonaire des malades qui participaient aux essais thérapeutiques. Une autre société, *PTC Therapeutics*, mène des essais cliniques sur une molécule nommée *ataluren*, qui s'attaque aux mutations, plus rares, responsables de la production des protéines CFTR tronquées. Avec cette substance, la machinerie de synthèse protéique passe outre certaines instructions « stop » erronées, ce qui évite la production d'une protéine raccourcie. Cette molécule est aussi testée dans d'autres maladies héréditaires dues à des codons stop mal placés, par exemple la dystrophie musculaire de Duchenne.

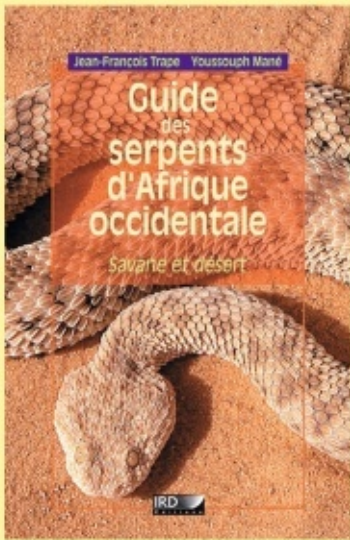
Activer un canal défectueux

Jusqu'à présent, les meilleurs résultats ont été obtenus pour la mutation G551D. Après avoir testé 228 000 substances, dirigées contre des cellules dont le canal chlore s'ouvrait mal, des chercheurs de la Société *Vertex* ont découvert un composé qui active le canal CFTR et améliore son efficacité de 50 pour cent. Les résultats préliminaires étaient prometteurs et le composé, VX-770, est aujourd'hui en cours d'essais cliniques de grande ampleur. Dans ces essais, les malades ont commencé à mieux respirer quelques semaines après le début du traitement, et l'amélioration s'est poursuivie pendant l'année qu'a duré l'essai clinique. De surcroît, les sujets ont été moins souvent hospitalisés et ont pris en moyenne entre 3 et 3,5 kilogrammes pendant leur traitement. L'un d'entre nous (S. Rowe) fut le premier clinicien aux États-Unis à administrer le VX-770 à un malade. En octobre 2011, *Vertex* a déposé une demande d'autorisation de mise sur le marché du médicament auprès de l'Agence américaine des aliments et médicaments, la FDA, et a lancé une procédure similaire auprès des instances européennes.

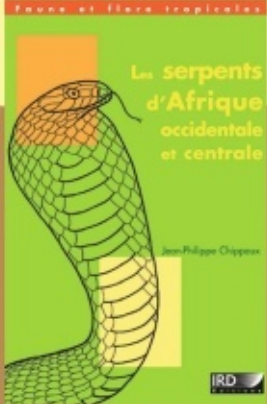
La découverte de plusieurs médicaments potentiels, qui cherchent à compenser les conséquences des anomalies génétiques responsables de la mucoviscidose, est le fruit de décennies de recherche sur la biologie de la maladie. Bien que des essais cliniques soient encore en cours pour établir si les composés disponibles sont sûrs et efficaces à long terme, les résultats obtenus jusqu'ici justifient notre optimisme : nous espérons être un jour en mesure de traiter cette maladie complexe.

**Institut de recherche pour le développement**

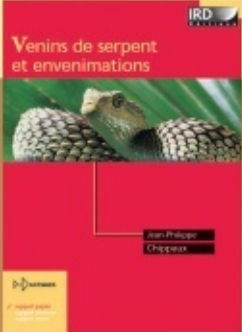
Un éditeur pour le développement



Guide des serpents d'Afrique occidentale
Savane et désert
Jean-François Trape, Youssouph Mané
IRD Éditions
228 p. 29 €



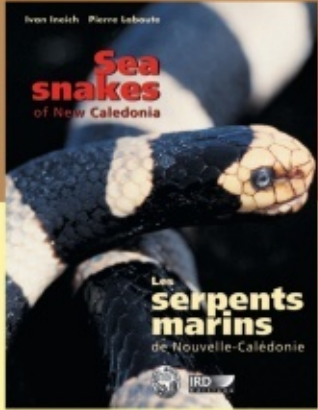
Les serpents d'Afrique occidentale et centrale
Jean-Pierre Chippaux
IRD Éditions
312 p. 28 €



Venins de serpent et envenimations
Jean-Pierre Chippaux
IRD Éditions
288 p. 28 €



Les serpents marins de Nouvelle-Calédonie
Y. Inéich, P. Laboute
IRD Éditions
304 p. 51 €



Sea snakes of New Caledonia
Y. Inéich, P. Laboute
IRD Éditions
304 p. 51 €

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr

www.ird.fr

Vide spatial, températures proches du zéro absolu, rayonnements intenses : les tardigrades résistent à tout !
D'où ces petits animaux tirent-ils leurs étonnantes capacités de survie ?

William Miller

Les tardigrades,

L'ESSENTIEL

- ✓ Les tardigrades, dont on connaît un millier d'espèces, forment un embranchement entier de l'arbre du vivant.
- ✓ Ces petits animaux, qui ont conquis presque toute la planète, sont très résistants. Ils peuvent se placer dans divers états de vie inactive, en réponse à des conditions extrêmes.
- ✓ Lorsque les conditions environnementales redeviennent favorables, ils reprennent leur vie active et réparent les éventuels dégâts subis.

William Miller



Qu'est-ce qui est plus résistant que les pingouins de l'Antarctique, les chameaux du désert, les vers tubicoles des abysses et les blattes, qui supportent des conditions extrêmes ? Les tardigrades, selon la chaîne de télévision américaine *Animal Planet*, qui a diffusé une série d'émissions sur les créatures les plus résistantes de la Terre il y a quelques années. À cette occasion, les tardigrades ont supplanté tous ces organismes au titre de « survivants de l'extrême ». Dressons le portrait du champion.

Les tardigrades sont de minuscules animaux translucides qui vivent un peu partout sur la planète. Ils mesurent en moyenne un demi-millimètre (500 micromètres) de longueur. Avec un bon éclairage, on peut souvent les distinguer à l'œil

nu. On les surnomme parfois « oursons d'eau », car leur morphologie évoque une sorte de panda (*voir la figure 1*).

La plupart des petits invertébrés remuent dans tous les sens. Les tardigrades, eux, se déplacent avec lenteur, escaladant posément de minuscules débris. Leur nom vient du latin *tardigrada*, qui signifie « marcheur lent ». Ils possèdent huit petites pattes boudinées, situées sous leur corps et ne dépassant pas sur les côtés, d'où leur démarche nonchalante et pataude.

Certaines espèces vivent dans les eaux douces ou salées. D'autres, dites terrestres, élisent domicile dans les endroits humides, au sein des mousses, des lichens, de l'humus des forêts, du sol ; en réalité, ces espèces ne sont que limnoterrestres, c'est-à-dire qu'elles vivent dans de minus-

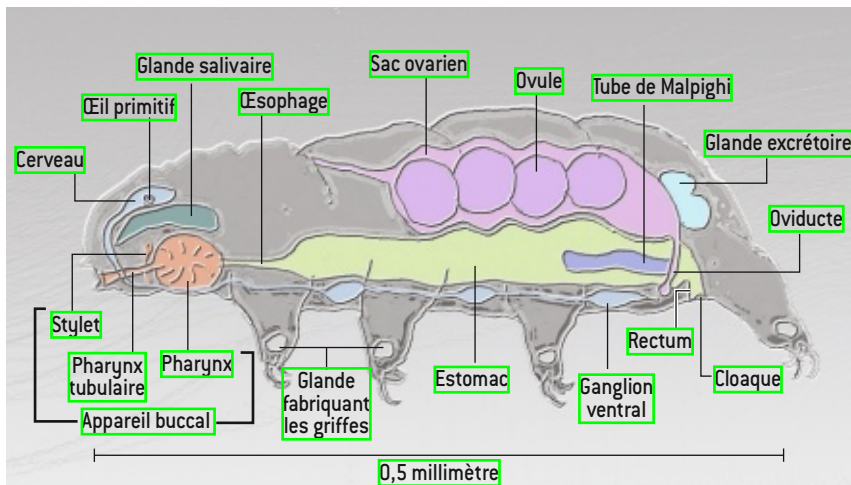
cules poches d'eau interstitielle au sein de ces habitats. Tous les tardigrades sont donc des animaux aquatiques.

Les tardigrades comptaient autrefois parmi les micro-organismes modèles pour l'étude du développement – un rôle aujourd'hui dévolu au nématode *Caenorhabditis elegans* (un petit ver), notamment suite aux travaux du biologiste sud-africain Sydney Brenner, prix Nobel de médecine en 1974. Les deux animaux offrent les mêmes qualités : simplicité physiologique, cycle de reproduction rapide et schéma de développement caractéristique. Comme

1. LES TARDIGRADES sont de petits animaux aquatiques d'un demi-millimètre de longueur en moyenne et d'aspects très divers. On les surnomme « oursons d'eau ».

survivants de l'extrême





2. CETTE COUPE TRANSVERSALE D'UN TARDIGRADE FEMELLE indique la position des différents organes. L'animal ne possède ni appareil circulatoire ni appareil respiratoire (à son échelle, le fluide baignant la cavité interne suffit à répartir l'oxygène et les nutriments dans l'organisme), mais pour le reste, il est assez similaire à un organisme de la macrofaune.

Le nématode *C.elegans*, le tardigrade peut être eutélique, ce qui signifie que le nombre de ses cellules – plus d'un millier – reste constant tout au long de sa croissance ; celle-ci s'effectue alors par grossissement et non par division des cellules.

Le corps d'un tardigrade est composé de cinq parties : une tête bien définie, et quatre segments dotés chacun d'une paire de pattes griffues, la forme des griffes variant selon les espèces (voir la figure 8). La dernière paire de pattes est dirigée vers l'arrière, dans une configuration unique au sein du monde animal. Les tardigrades l'utilisent pour s'accrocher et pour accomplir des mouvements lents et acrobatiques, plutôt que pour marcher.

Leur anatomie et leur physiologie sont similaires à celles d'animaux plus gros. Ils ont un appareil et un canal digestifs complets. La bouche est suivie d'un pharynx, d'un oesophage, d'un estomac, d'un intestin et d'un cloaque. Les muscles sont bien développés. En revanche, ils ne disposent que d'une seule gonade.

Le cerveau des tardigrades est placé dorsalement et relié à un système nerveux ventral (celui des humains, situé dans la colonne vertébrale, est dorsal). Leur corps est empli d'un fluide en contact avec toutes les cellules, assurant une nutrition efficace et les échanges gazeux, sans recours à des appareils circulatoire et respiratoire.

Les taxinomistes classifient le monde vivant en trois domaines : les bactéries (organismes unicellulaires dépourvus de noyau), les eucaryotes (organismes dont les cellu-

les ont un noyau) et les archées (organismes unicellulaires autrefois nommés archéobactéries en raison de similarités visuelles avec les bactéries, mais qui sont probablement plus proches des eucaryotes en termes d'évolution). Les eucaryotes sont divisés en quatre grands règnes : les protistes, les plantes, les champignons et les animaux. Le règne animal comprend environ 36 embranchements, ou phyla (le chiffre varie selon les experts), et les tardigrades forment l'un d'eux ; ils représentent donc une branche entière de l'arbre du vivant.

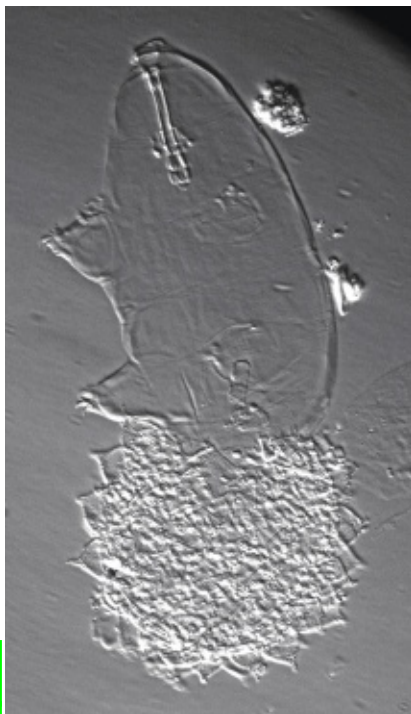
Le corps des tardigrades est recouvert d'une cuticule robuste mais souple, qu'ils rejettent en grandissant. C'est pourquoi ils sont placés dans la lignée évolutive des ecdysozoaires, définie par cette caractéristique. Ils y côtoient des animaux tels que les nématodes et les arthropodes (araignées, insectes, crustacés, etc.), qui effectuent aussi une ou plusieurs mues cuticulaires au cours de leur développement. L'été, on trouve un peu partout leurs dépouilles abandonnées sur les troncs d'arbre.

Les tardigrades se répartissent en deux ordres : les eutardigrades et les hétérotardigrades. En général, la cuticule des premiers est lisse, tandis que celle des seconds est divisée en plaques (voir la figure 5).

Des champions de la survie

Les tardigrades sont surtout connus pour leur aptitude à supporter des conditions extrêmes. En laboratoire, ils ont été soumis à des températures de 0,05 kelvin ($-273,10^{\circ}\text{C}$, pratiquement le zéro absolu) pendant 20 heures, avant d'être réchauffés et réhydratés : ils sont alors revenus à la vie active. Ils ont été placés à -200°C durant 20 mois et ont survécu. Ils ont été exposés à une température de 150°C , bien supérieure au point d'ébullition de l'eau, et n'ont pas succombé pour autant. Ils ont supporté une pression de 75 000 atmosphères et des concentrations élevées de gaz asphyxiants (monoxyde et dioxyde de carbone, azote, dioxyde de soufre...). Ils ont même résisté au rayonnement ultraviolet présent dans l'espace.

Seules certaines espèces de tardigrades terrestres ont développé ces capacités de survie hors du commun. Leurs formes marines et d'eau douce n'en ont pas eu besoin, car leur environnement reste stable. En revanche, le microenvironnement humide des tardigrades terrestres se modifie régu-



3. UN TARDIGRADE SORTANT D'UN ŒUF, observé au microscope optique. Les tardigrades sont translucides, bien que les images au microscope électronique donnent l'impression d'une cuticule opaque. Leurs couleurs sont diverses : blanc, vert, orange, rouge...

lièrement, par exemple en s'asséchant (on parle de dessiccation) plus ou moins vite en raison de variations climatiques, et est parfois soumis à des conditions météorologiques extrêmes. En outre, les mousses et les lichens dans lesquels les tardigrades élisent domicile peuvent être exposés, pour des périodes plus ou moins longues, aux rayons ultraviolets du Soleil. Cet habitat ne leur procure qu'une mince couche de protection, il est loin de les isoler totalement des agressions de l'environnement.

Alterner vie active et vie inactive

Leurs capacités de survie sont alors étonnantes : les froids intenses, par exemple, feraient éclater des cellules ordinaires, majoritairement constituées d'eau. En effet, l'eau se dilate lorsqu'elle approche du point de congélation, raison pour laquelle la glace flotte. À une température de 4°C, elle atteint un volume suffisant pour faire éclater une grosse pierre qui en est imbibée, un récipient métallique qui en est rempli ou des cellules vivantes. Comment les tardigrades y survivent-ils ? Comment résistent-ils aux chaleurs intenses, qui devraient faire bouillir leur eau interne ? Et pourquoi les rayonnements spatiaux n'endommagent-ils pas irréversiblement leur ADN ?

Nous sommes loin d'avoir toutes les réponses, mais nous avons tout de même des pistes. Les tardigrades terrestres ont la faculté d'alterner vie active et vie inactive. En période d'activité, ils se nourrissent, se battent, se reproduisent et se déplacent. En période d'inactivité, ils se

placent dans des états dits d'anoxymbiose ou de cryptobiose.

L'anoxymbiose survient en réponse à un manque d'oxygène. Les tardigrades y sont très sensibles. Une asphyxie prolongée entraîne une panne du système d'osmorégulation, qui contrôle la quantité d'eau interne. Le tardigrade se met alors à gonfler comme un bonhomme Michelin et à flotter dans son environnement. Dans cet état, il survit au manque d'oxygène, pour des raisons encore à élucider. Cela dure quelques jours, jusqu'à ce que le taux d'oxygène redevienne normal et qu'il puisse reprendre sa vie active.

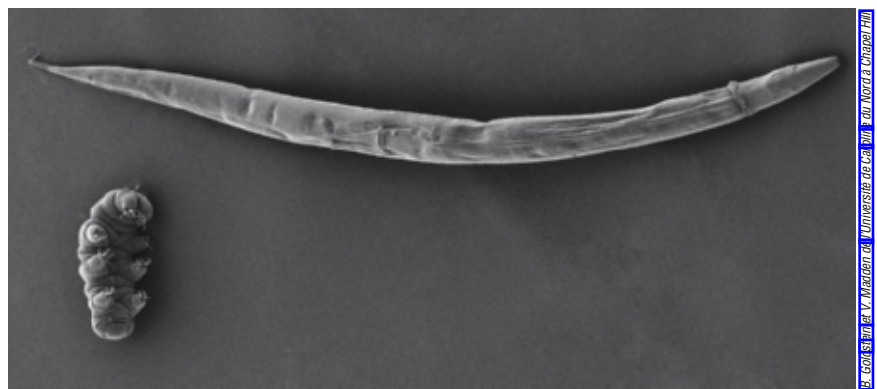
La cryptobiose est un état réversible au cours duquel l'activité métabolique est suspendue. Dans cet état, le tardigrade résiste à presque tout ; les spécimens soumis à des conditions environnementales extrêmes avaient d'ailleurs au préalable été placés en état de cryptobiose.

L'AUTEUR

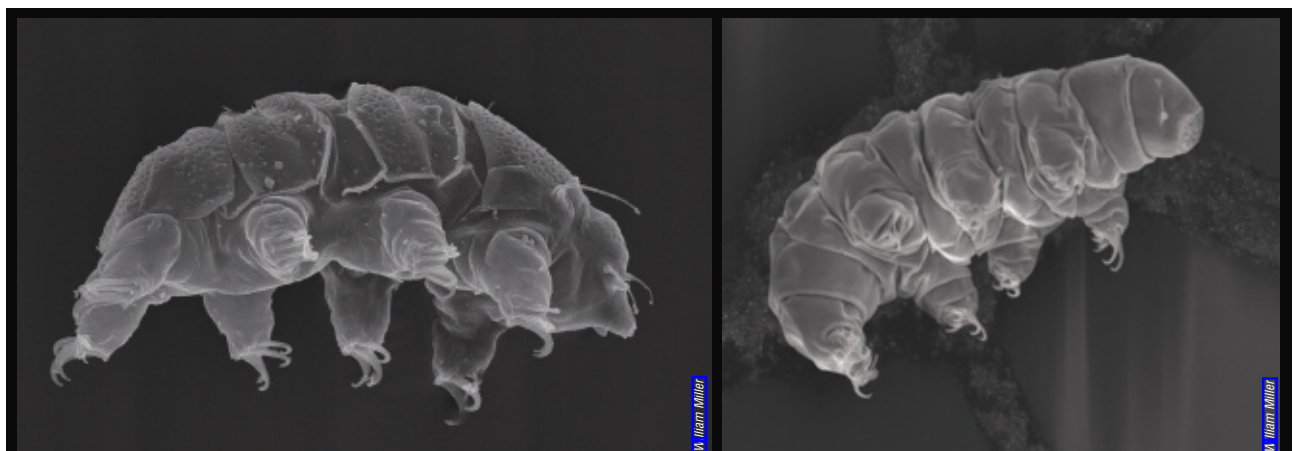


William MILLER est directeur de recherche en biologie et maître de conférences à l'Université Baker dans le Kansas (États-Unis).

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



4. LE NÉMATODE *CAENORHABDITIS ELEGANS* (en haut) a supplanté le tardigrade (en bas) comme invertébré modèle pour les biologistes, mais pas dans la chaîne alimentaire. En effet, les tardigrades se nourrissent de nématodes, ainsi que d'autres petits animaux et de végétaux.



5. DEUX GRANDS TYPES DE TARDIGRADES existent, distingués par la forme de leur cuticule (une sorte de carapace) : les hétérotardigrades, dotés de plaques cuirassées (à gauche), et les eutardigrades, à la « peau » lisse (à droite). Leur cuticule contient de la chitine, comme celle des insectes. La cuirasse des hétérotardigrades pourrait les protéger et ralentir leur dessiccation, les favorisant ainsi dans les milieux secs.

La résistance en chiffres

En état de cryptobiose, les tardigrades vivent jusqu'à plusieurs dizaines d'années et résistent pendant des durées variables à :

Des températures extrêmes, allant de -273°C à $+150^{\circ}\text{C}$.

Des pressions extrêmes, d'un vide quasi absolu à une pression de 75 000 atmosphères.

Des excès de gaz asphyxiants, tels du monoxyde et du dioxyde de carbone, de l'azote et du dioxyde de soufre.

Des rayons X et ultraviolets, tels que ceux qui règnent dans l'espace.

Cet état se décline en plusieurs formes, survenant lors de diverses agressions environnementales. L'une de ces formes est l'anhydrobiose – terme signifiant « la vie sans eau ». Elle apparaît en réponse à l'assèchement des poches d'eau interstitielle où vit le tardigrade. L'animal se déshydrate alors – très lentement, sinon il ne survit pas –, perdant jusqu'à 97 pour cent de son eau. En conséquence, il se ratatine et sa taille se réduit au tiers de ce qu'elle était auparavant. Il rentre ses pattes et sa tête et se met en boule, réduisant ainsi la surface exposée : il prend la forme d'un tonnelet. Lorsqu'il a perdu la quasi-totalité de son eau, son métabolisme s'arrête.

L'anhydrobiose est un état ordinaire qu'un tardigrade peut connaître de nombreuses fois par an. Réhydraté par la rosée, la pluie ou la neige fondante, il se transforme et reprend sa vie active en quelques minutes à quelques heures.

La cryobiose est un autre exemple de cryptobiose : comme lors de l'anhydrobiose, l'animal se déshydrate et se transforme provisoirement en tonnelet, mais cette fois pour survivre à des froids intenses.

Toute température inférieure au point de congélation du cytoplasme des cellules suspend la mobilité moléculaire, et donc le métabolisme. On s'attendrait à ce que des températures aussi basses entraînent aussi des dégâts structurels. Mais les tardigrades, nous l'avons vu, endurent les froids les plus intenses. Cela pourrait être dû à la synthèse d'agents protecteurs, comme on en trouve chez les insectes : ces molécules abaisseraient la température de congélation des tissus et ralentiraient le processus, ménageant ainsi une période de transition qui permettrait de passer à l'état de cryobiose. Le tardigrade finit par geler, mais ces agents modulent peut-être aussi la formation de la glace, empêchant la formation de gros cristaux qui risqueraient de déchirer les tissus. D'autres hypothèses suggèrent que l'animal présente une structure cellulaire particulière, qui lui permet de résister à la glace.

Autre forme de cryptobiose, l'osmobiose : c'est la réaction à un degré extrême de salinité, qui peut entraîner un gonflement fatal. Certains tardigrades supportent cette salinité, mais d'autres ne peuvent

LE TARDIGRADE DANS TOUS SES ÉTATS

Les tardigrades présentent toute une panoplie de techniques de survie. En réponse à des conditions environnementales extrêmes (froid, manque d'oxygène ou d'humidité...), ils se placent dans différents états de vie inactive.

La plupart de ces états inactifs ne sont adoptés que par les tardigrades terrestres, tandis que l'enkystement, encore mal connu, est réservé aux espèces « aquatiques ».

Les états décrits dans la partie inférieure du schéma ci-dessous sont regroupés sous le nom de cryptobiose : dans ces états, où l'animal se déshydrate et prend la forme d'un tonnelet, l'activité métabolique est suspendue. Chez d'autres organismes, cela indiquerait la mort, mais les tardigrades reprennent leur vie active dès que les conditions redeviennent favorables.

Anoxybiose (manque d'oxygène)
L'osmorégulation se dérègle, ce qui provoque le gonflement de l'animal.

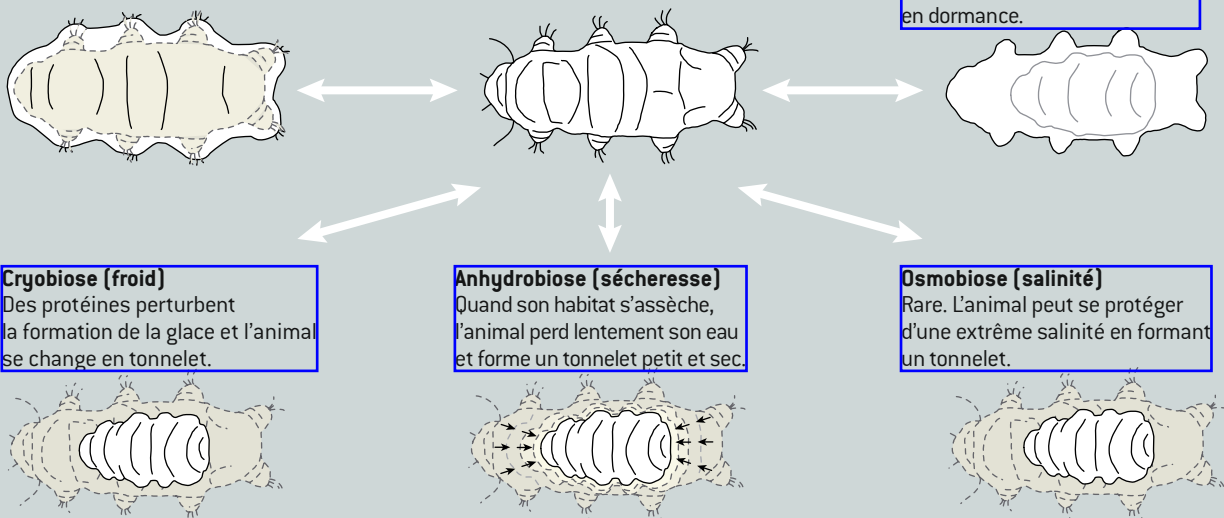
Vie active
Le tardigrade se nourrit, se développe, bouge et se reproduit.

Enkystement (sécheresse)
L'organisme se rétracte dans la cuticule, s'entoure de nouvelles couches cuticulaires et entre en dormance.

Cryobiose (froid)
Des protéines perturbent la formation de la glace et l'animal se change en tonnelet.

Anhydrobiose (sécheresse)
Quand son habitat s'assèche, l'animal perd lentement son eau et forme un tonnelet petit et sec.

Osmobiose (salinité)
Rare. L'animal peut se protéger d'une extrême salinité en formant un tonnelet.



y résister qu'en formant un tonnelet imperméable aux sels.

En 2007, le tardigrade est devenu le premier animal pluricellulaire ayant survécu dans l'espace. En effet, des spécimens ont été embarqués sur la capsule russe FOTON-M3, dans le cadre de l'expérience européenne BIOPAN 6. Pendant que la capsule était en orbite à 260 kilomètres de la Terre, les chercheurs ont déclenché l'ouverture de boîtiers contenant des tardigrades en état d'anhydrobiose, afin de les exposer directement au rayonnement solaire et au vide spatial. De retour sur Terre, les tonnelets ont été réhydratés. Quelques animaux se sont alors mis à bouger, à manger, à grossir, à muer et à se reproduire : ils avaient survécu.

Au cours de l'été 2011, dans le cadre du projet BIKIS, parrainé par l'Agence spatiale italienne, des tardigrades ont été embarqués à bord de la navette spatiale américaine *Endeavour* et ont été exposés à des rayonnements ionisants. Les résultats sont en cours d'analyse.

Préserver l'ADN

Les puissants rayonnements de l'espace devraient endommager irrémédiablement l'ADN, pourtant certains tardigrades y survivent. Comment ? Une possibilité serait l'existence d'un système de réparation de l'ADN très efficace, ou tout au moins particulièrement résistant, qui se déclencherait lorsque l'animal revient à un stade actif : ainsi, la bactérie *Deinococcus radiodurans* possède des protéines qui supportent de puissantes radiations et réparent ensuite l'ADN, très endommagé par ces dernières. Selon Daiki Horikawa, de l'INSERM, la résistance des tardigrades viendrait plutôt d'un système qui protège l'ADN et empêche sa destruction.

En outre, la résistance active de certaines espèces aux fortes salinités suppose un métabolisme vigoureux : l'animal maintient une salinité acceptable dans son milieu interne en pompant des ions vers l'extérieur, ce qui requiert une dépense d'énergie farouche. Ainsi, les tardigrades semblent apporter deux types de réponse aux conditions environnementales extrêmes : la réponse passive qu'est l'état de dormance ou de cryptobiose, et l'hyperréactivité du processus de réparation de l'ADN – qui reste à prouver – et de l'osmorégulation. En matière de stratégie d'adaptation évolutive, les tardigrades sont des virtuoses.

Grâce à leurs capacités de survie, ces animaux minuscules ont conquis la quasi-totalité de la planète : de l'Arctique à l'équateur, des zones intertidales (la partie du littoral alternativement couverte et découverte par la marée) jusqu'aux profondeurs des océans... On en a même découvert au sommet des grands arbres, où ils ont probablement été apportés par le vent. À l'état de tonnelets, on les distingue à peine des particules de poussière.

Comme les spores, le pollen et les graines, les tonnelets risquent d'atterrir dans des microenvironnements qui ne leur conviennent pas. Toutefois, quand ils échouent dans un lieu peu favorable, ils n'ont qu'à attendre un changement de saison ou quelques précipitations : dès que les conditions climatiques sont plus clémentes, la vie peut reprendre son cours.

Si les tardigrades de mousses, de lichens ou d'humus sont de grands voyageurs, c'est aussi parce que nombre d'entre eux sont parthénogénétiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent se reproduire sans fécondation – ils produisent directement des œufs. Quelques-uns sont hermaphrodites – ils fabriquent à la fois des gamètes mâles et femelles, et sont capables de s'autoféconder. Un tardigrade isolé est alors en mesure de fonder une population là où il atterrit.

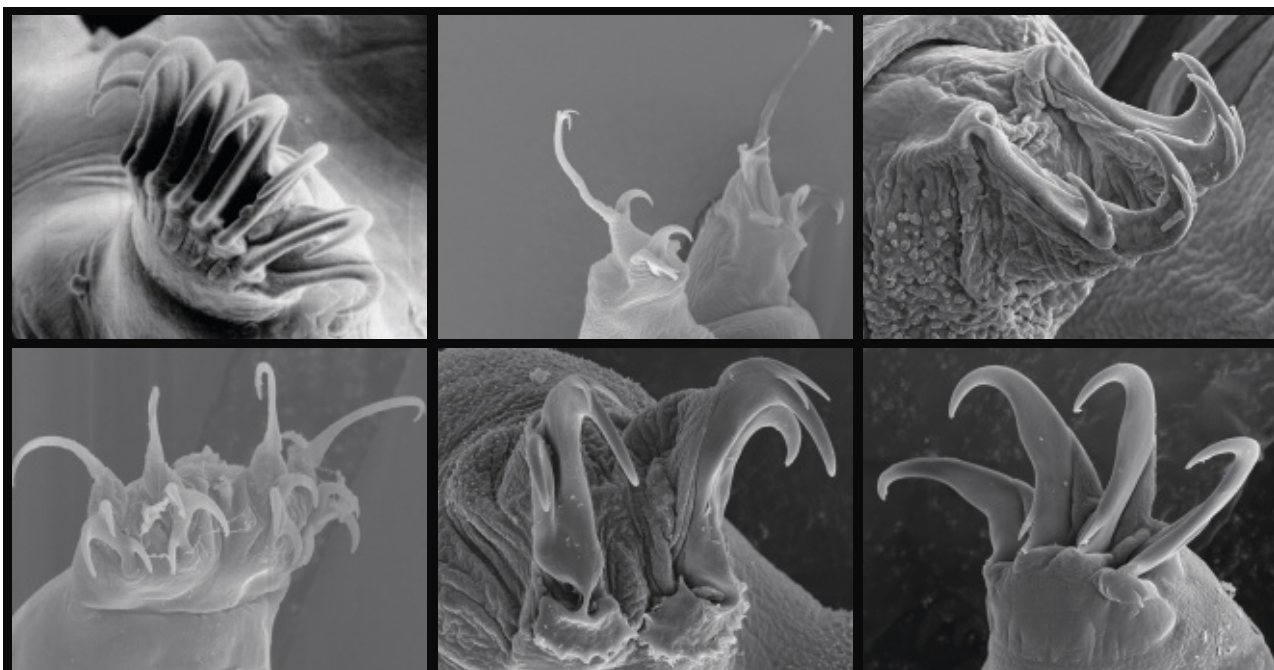
À ce jour, environ 1 100 espèces de tardigrades ont été décrites, mais toutes ne sont pas valables. Il existe des doublons ou des erreurs d'interprétation. En réalité, un millier d'espèces ont été correctement décrites et identifiées. Elles se répartissent en 300 formes marines, 100 d'eau douce et 600 espèces terrestres.



6. LORS DE LA CRYPTOBIOSE, le tardigrade se contracte – il divise sa taille par trois – et prend la forme d'un tonnelet. Dans cet état, il peut résister à des conditions environnementales extrêmes.



7. MULTIPSEUDECHINISCUS RANEYI sera-t-il un jour le nom de ce tardigrade, vu ici au microscope optique ? C'est en tout cas ce qu'ont proposé l'auteur et son étudiante, Rachel Schulte. Ils ont découvert ce spécimen dans un endroit où son espèce n'avait jamais été repérée. Leurs observations les ont conduits à modifier son classement au sein de l'arbre des tardigrades.



© W. Miller et C. V. Essary, de l'Université McGill

8. CES GRIFFES DE TARDIGRADES sont grossies plusieurs milliers de fois. Leur étonnante variété suggère des adaptations en fonction du mode de vie. Les minuscules crochets sont ainsi très pratiques pour harponner de petits aliments, tandis que les griffes hérissées semblent servir à attaquer des proies plus grosses. Les

griffes pourraient aussi permettre aux mâles d'agripper les femelles lors de l'accouplement – celles situées sur les pattes antérieures de certains mâles sont plus robustes. Elles ont peut-être des formes optimisées pour former un tonnelet lors de la cryptobiose. Cela reste à confirmer.

✓ SUR LE WEB

J. Glime, *Bryophyte Ecology*, 2010 (chapitre sur les tardigrades).
www.bryocool.mtu.edu.

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Kristensen *et al.*, *Survival in extreme environments – on the current knowledge of adaptations in tardigrades*, *Acta Physiologica*, vol. 202, pp. 409-420, 2011.

D. Persson *et al.*, *Extreme stress tolerance in tardigrades: Surviving space conditions in low earth orbit*, *Journal of Zool. Syst. and Ev. Res.*, vol. 49, pp. 90-97, 2011.

W. Welnicz *et al.*, *Anhydrobiosis in tardigrades – the last decade*, *Journal of Insect Physiology*, vol. 57, pp. 577-583, 2011.

Y. Séméria, *Tardigrades continentaux : Oligohydrobiontes et Hétérohydrobiontes*, Fédération française des sociétés de sciences naturelles, 2003.

W. Miller, *Tardigrades : Bears of the moss*, *The Kansas School Naturalist*, vol. 43, pp. 1-16, 1997.

Ces dernières sont plus faciles à repérer et suscitent l'intérêt de nombreux chercheurs depuis longtemps.

La recherche de nouvelles espèces est un domaine très actif. Mes étudiants en ont découvert et décrit quatre, et nous sommes en train de travailler à la confirmation d'une demi-douzaine d'autres. Nous sommes persuadés qu'il en reste un grand nombre à découvrir, notamment dans les milieux non terrestres.

Parfois, une découverte conduit à réviser la classification. C'est ce qui s'est produit en été 2010, dans le cadre de notre programme de Master, conçu pour enseigner la recherche en explorant l'embranchement des Tardigrades en Amérique du Nord. Rachel Schulte, une étudiante, examinait des échantillons collectés quelques années auparavant en Californie. Après une semaine de travail, elle m'apporta un spécimen. Il semblait appartenir à la famille des Echiniscidae et au genre *Pseudechiniscus*, mais quelques caractéristiques ne correspondaient pas : le tube buccal, par exemple, était souple et recourbé, alors qu'il aurait dû être rigide; en outre, la cuticule était divisée en un nombre inhabituellement élevé de plaques (voir la figure 7).

Nous avons alors consulté la littérature. L'animal ressemblait à une espèce nommée

Pseudechiniscus raneyi, découverte dans les années 1960. Elle avait été rangée parmi les *Pseudechiniscidae* en se fondant sur la description de ce genre, établie en 1911 par Gustav Thulin. Mais en 1987, Reinhardt Kristensen, de l'Université de Copenhague, au Danemark, a redéfini la famille des Echiniscidae, en y ajoutant des genres ainsi qu'en corrigeant et en détaillant la description des genres existants. Or notre tardigrade ne correspondait plus au genre *Pseudechiniscus* – et ne ressemblait pas non plus aux nouveaux genres. R. Kristensen n'avait probablement jamais vu de spécimen de *Pseudechiniscus raneyi*, espèce assez rare, sinon il aurait remarqué cette divergence.

Nous avons alors proposé un nouveau genre, nommé d'après l'un des traits caractéristiques les plus marquants de notre spécimen : la présence de nombreuses plaques cuticulaires. Nous ne pouvions pas changer le nom de l'espèce (le second terme dans le binôme latin), car nous n'en étions pas les découvreurs. Notre tardigrade serait donc un *Multipseudechiniscus raneyi*. L'article qui rend compte de nos travaux est en cours d'examen par une revue scientifique.

Les tardigrades ont donc encore beaucoup à nous apprendre. Outre leur exceptionnelle résistance, leur diversité reste un sujet d'étude et d'étonnement...

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters.php.

■ Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.

■ Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.

■ Suivez notre actualité en direct



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

HISTOIRE DES SCIENCES

Wurtz et l'hypothèse atomique

La matière est-elle constituée d'atomes ? Tout au long du XIX^e siècle, cette question a divisé les chimistes. En France, l'acceptation de cette hypothèse fut le combat d'une vie, celle du chimiste Charles-Adolphe Wurtz.

Natalie PIGEARD-MICAULT

Au début du XIX^e siècle, la chimie se veut science. En 1787, le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier l'a dotée d'un langage logique et d'une méthodologie : les éléments chimiques sont définis comme des corps simples soit par nature, soit par manque d'outils pour les diviser. Quant à la méthodologie, elle est claire : observer, peser, mesurer et expérimenter. Pourtant, en 1808, un ouvrage d'un professeur de sciences britannique, John Dalton, intitulé *Nouveau système de philosophie chimique*, ébranle pour longtemps ce bel édifice. Dans un premier temps bien accueilli par les chimistes, il crée parmi eux une zizanie qui durera près d'un siècle. Pourquoi ? Parce que Dalton y parle d'atome et que l'atome est invisible.

Si le concept d'atome date de l'Antiquité, il est, à cette époque, tombé dans l'oubli. Selon Dalton, la matière serait constituée d'atomes indivisibles (*a-tome*, qu'on ne peut diviser), identiques entre eux pour un même élément, ayant un poids fixe et pouvant se combiner pour former des corps composés. Or pour nombre de chimistes, il est inconcevable de réintroduire de l'hypothèse, de l'imaginaire, dans leur science fondée sur l'observation et l'expérimentation.

En France, la querelle autour de l'existence de l'atome s'est cristallisée autour de deux chimistes : Charles-Adolphe Wurtz, fervent défenseur de l'hypothèse atomique, et Marcellin Berthelot, partisan d'une science exempte de toute hypothèse. Qui l'a emporté ? Nous allons voir que la réponse n'est pas si

simple. Pour le comprendre, revenons au moment où Dalton a publié son livre.

Dans un premier temps, ce n'est pas l'hypothèse de Dalton sur la constitution de la matière qui attire l'attention des chimistes. Après tout, l'atome de Dalton peut être compris comme l'élément de Lavoisier. Ce qui les intéresse, c'est sa théorie des « poids atomiques ». Selon Dalton, l'eau est constituée d'un atome d'oxygène (noté aujourd'hui O) et d'un atome d'hydrogène (noté aujourd'hui H). Il décrit ainsi l'eau par la formule chimique suivante : $H + O = HO$ (voir la figure 2). Or dans neuf grammes d'eau, il trouve un gramme d'hydrogène et huit grammes d'oxygène. En généralisant ce raisonnement et en prenant pour base l'hydrogène égal à 1, on calcule le poids de chaque atome. Associée à de nouvelles découvertes permettant de subdiviser les corps composés, cette théorie des poids atomiques permet de mettre en évidence de très nombreux corps simples.

Atome ou molécule ?

Pourtant, quelques mois après la publication de Dalton, un Français, Joseph Louis Gay-Lussac, dénonce l'incohérence de la théorie atomique. Travaillant non pas à partir de poids, mais de volumes, Gay-Lussac ne trouve pas les mêmes résultats que Dalton. Lors de ses expériences, il obtient, en prenant un volume d'hydrogène et un volume de chlore, deux volumes d'acide chlorhydrique et non un volume comme la théorie de Dalton l'affirme. Comment lever cette contradiction ?

Le chimiste italien Amedeo Avogadro et le physicien français André Marie Ampère arrivent séparément à la même conclusion : pour obtenir, à partir de deux volumes de gaz différents, deux volumes de gaz composé, il faut considérer que les atomes de Dalton peuvent encore se diviser. En d'autres termes, l'élément constitutif du gaz d'hydrogène – ce que Dalton nomme atome d'hydrogène – est en fait constitué lui-même de deux corps encore plus simples.

En divisant les atomes de Dalton, Avogadro et Ampère introduisent la distinction entre atome et molécule : l'hydrogène gazeux est une molécule constituée de deux atomes. En généralisant cette expérience, ils édictent une loi connue aujourd'hui sous le nom de loi d'Avogadro-Ampère : il y a toujours le même nombre de molécules dans des volumes égaux de gaz soumis aux mêmes conditions de température et de pression. Appliquée aux théories de Dalton et de Gay-Lussac, cette loi stipule qu'une molécule d'un gaz simple est toujours constituée de deux atomes. Pour beaucoup de chimistes, la preuve de l'existence des atomes est faite.

Cependant, si cette loi s'applique à la plupart des gaz, certains posent problème. Le phosphore, le soufre, le mercure et l'arsenic semblent ne pas être formés de deux atomes. Jean-Baptiste Dumas, chimiste français renommé, se penche sur cette incohérence. N'arrivant pas à expliquer l'exception, Dumas se lance dans une guerre contre la théorie atomique, dont il avait auparavant été un fervent défenseur. Il en est sûr, cette erreur scientifique n'est due qu'à un égarement épis-

témologique. La science chimique se perd dans des recherches spéculatives sur la constitution intime de la matière. Jamais, pour rester science, elle n'aurait dû s'éloigner des faits observables. Elle aurait dû se contenter de les traduire par des lois simples et claires qui n'ont nul besoin de chercher l'invisible pour se justifier.

En 1836, Dumas renie son passé d'atomiste et invite ses confrères à faire de même : « Ce qui nous reste, c'est la conviction que la chimie s'est égarée là, comme toujours, quand, abandonnant l'expérience, elle a voulu marcher sans guide au travers des ténèbres (...). Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience ; et jamais en chimie nous ne devons aller plus loin que l'expérience. »

Dès lors (et jusqu'en 1894 !), le mot atome est banni des manuels scolaires. Dumas revient à un système de notation plus neutre : celui des poids équivalents. Mesurés sur la balance, ces poids expriment les proportions pondérales entre les corps mis en réaction, tout comme les poids atomiques de Dalton, mais sans faire appel à d'hypothétiques atomes.

Une cacophonie de notations

Toutefois, on ne passe pas si facilement d'une notation à une autre, surtout quand, derrière elle, c'est toute la définition de la pratique scientifique qui est en jeu. D'autant que, par ailleurs, les résultats s'accumulent en chimie. Certains découvrent de nouveaux corps, d'autres établissent des lois sur leur affinité, sur leurs charges électriques, sur l'agencement des corps simples dans un corps composé, etc. Cet essaim de recherches chimiques entraîne une multiplication des systèmes de notation.

Parmi ceux qui prennent pour base l'hydrogène $H = 1$, certains s'expriment en poids équivalent – pour eux, l'oxygène O vaut alors 8 – et d'autres en poids atomique (selon la loi d'Avogadro-Ampère) – pour eux, $O = 16$. Des atomistes, tel Berzelius, vont jusqu'à barrer leurs symboles chimiques pour les différencier des équivalents. D'autres encore ont pour base $O = 100$, ou encore $O = 1$. On



MUSEE CURIE (COLLECTION)

trouve même $H = 100$. Que le chimiste soit français, anglais, prussien ou autre, il lui est nécessaire de connaître l'auteur de l'article qu'il lit afin de savoir quelle conversion il doit faire pour le comprendre. La chimie devient alors plus une science de conversion qu'autre chose.

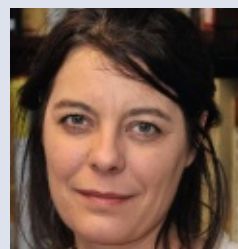
C'est dans cette cacophonie de notations, formules, lois, théories que le jeune Wurtz se lance dans la chimie. Après des études médicales strasbourgeoises et un stage dans le laboratoire du chimiste allemand Justus von Liebig en 1842, Wurtz arrive dans le laboratoire privé de Dumas en 1844. Président de l'Académie des sciences, membre de l'Académie de médecine, professeur de chimie organique à la Faculté de médecine, professeur de chimie et doyen de la Faculté des sciences, Dumas représente alors le pouvoir scientifique en France.

Dumas prend vite Wurtz sous son aile. Il lui procure des postes rémunérés, l'introduit dans la communauté scientifique, facilite sa promotion. De son côté, Wurtz sait que Dumas tient les rênes du pouvoir dans ce champ de bataille théorique qu'est la chimie. Aussi n'entre-t-il surtout pas dans la polémique.

Quand, fin 1852, Dumas donne sa démission à la Faculté de médecine, Wurtz est tout naturellement nommé pour le remplacer, le 2 février 1853. L'indépendance qu'il

1. UN LABORATOIRE DE CHIMIE vers 1885 : celui de Henri Debray à l'École normale supérieure. Debray était l'assistant de Henri Sainte-Claire Deville, un des chimistes qui s'opposèrent à la théorie atomiste de la matière défendue par Charles-Adolphe Wurtz.

L'AUTEUR



Natalie PIGEARD-MICAULT est docteur en épistémologie et histoire des sciences. Ingénieur d'études au CNRS, elle est responsable des archives du musée Curie, à Paris.

acquiert alors vis-à-vis de Dumas lui permet enfin d'entrer dans la bataille scientifique. Dès 1853, devant l'Académie des sciences, Wurtz affirme rechercher dans les formules chimiques « un véritable sens moléculaire » : il veut comprendre l'invisible agencement de la matière et le traduire par des formules. Trois ans plus tard, il découvre une nouvelle famille de molécules, les glycols. Il explique avoir été guidé par la théorie et non l'expérience. Il ose même parler de molécule diatomique, adhérent ainsi à la loi d'Avogadro-Ampère.

Quand, en 1860, il retrace l'histoire de sa découverte, il utilise pour la première fois la notation atomique. Il faut dire qu'il revient tout juste d'un congrès international organisé pour mettre fin à la multiplicité des notations. Suite à la campagne de l'Italien Stanislao Cannizzaro, la majorité des chimistes européens, dont Wurtz, y a adopté la notation atomique, jugée la plus féconde. Mais la plupart des chimistes français, d'emblée opposés à cette notation, n'ont pas participé au congrès, et Wurtz devient en France l'avocat d'une notation toujours exclue.

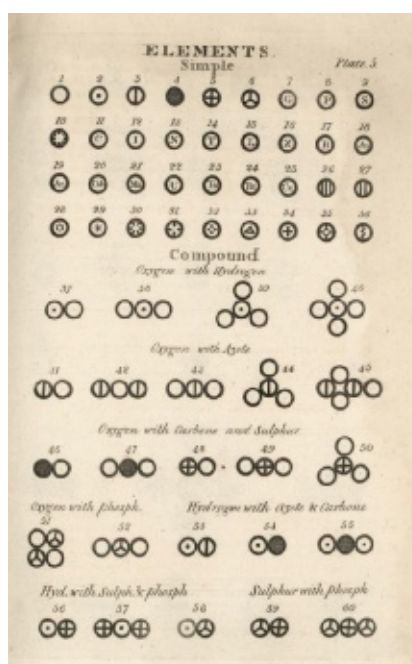
Des boules pour représenter les atomes

Wurtz a compris que pour faire admettre la notation atomique, il lui faut l'enseigner et la divulguer. Depuis qu'il est professeur à la Faculté de médecine, il a ouvert un petit laboratoire privé de chimie : celui-ci devient le lieu où il convainc la future élite de chimistes. Investie par ses disciples, la nouvelle Société chimique devient – via son Bulletin – un organe de diffusion de la notation atomique. De succès en succès, Wurtz affirme et impose de plus en plus la notation atomique, voire la théorie atomique. Il l'enseigne même au Collège de France durant l'été 1863.

Entre-temps, Wurtz rencontre un adversaire de taille : Marcellin Berthelot. Entre Berthelot et Wurtz, c'est déjà la guerre des postes, des honneurs et des distinctions. S'y joint désormais celle, scientifique, entre celui qui refuse le mot même d'atome et celui qui écrit en notation atomique et prône la validité de la théorie associée.

Un événement éloigne alors Wurtz de la chimie. Fin 1865, devant les manifestations

étudiantes, le doyen de la Faculté de médecine, Ambroise Tardieu, démissionne. Pas un médecin ne veut prendre la succession, ou n'est proposé au décanat. Le 18 janvier 1866, Wurtz, simple professeur de chimie – une science dite accessoire à la médecine – est nommé nouveau doyen. Cette charge l'éloigne de la bataille de l'atome durant dix ans, même si sa position est restée dans les esprits et ressurgit de façon inopinée.



2. SYMBOLES DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES
utilisés en 1808 par John Dalton dans son *Nouveau système de philosophie chimique*. Dalton utilisait des petits cercles différents pour les 36 éléments chimiques connus alors. Les symboles actuels ne furent introduits qu'en 1813 par le chimiste suédois Jöns Berzelius.

En 1868, jugeant l'enseignement de la Faculté trop matérialiste, le clergé dénonce les conséquences immorales et dangereuses d'une telle conception de l'être humain. Au nom de l'autonomie de la science, Wurtz condamne cette intrusion du clergé. Repris dans la presse, son discours est remarqué, et déformé : Wurtz défend l'enseignement de la Faculté ? Il est donc matérialiste, d'autant plus qu'il est atomiste... Wurtz, fervent protestant qui conçoit très bien la coexistence d'un corps fait d'atomes et d'une

« âme », est catalogué comme matérialiste par les médecins. Et à l'inverse, les chimistes, surtout Berthelot, le qualifient de spiritualiste parce qu'il croit en cet atome invisible.

En 1874, à Lille, Wurtz, las de son décanat, signe son retour à la chimie par un discours engagé, largement diffusé : « Ce qui remplit l'espace, c'est-à-dire la matière, n'est pas divisible à l'infini, mais se compose d'un monde de particules invisibles, insaisissables, et qui possèdent néanmoins une étendue réelle et un poids déterminé. Ce sont les atomes. » Pour la première fois, Wurtz ne se contente pas de défendre la notation atomique : il affirme croire en l'existence réelle des atomes.

C'est même toute sa conception de la science qu'il révèle : il déclare que l'objectif du scientifique est « de rechercher la nature intime des phénomènes et leurs causes ». Or pour Berthelot, la nature intime des phénomènes étant invisible et inaccessible, elle relève d'un champ de réflexion non pas scientifique, mais métaphysique : la science ne spéculer pas.

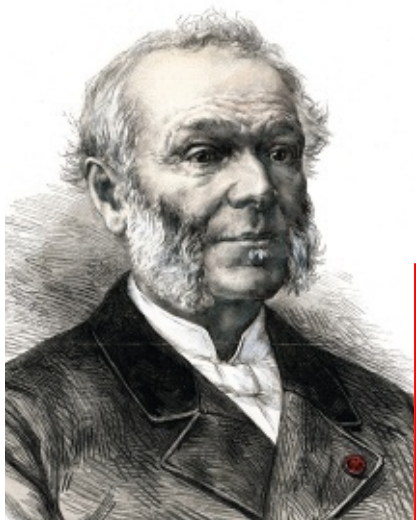
Deux ans plus tard, Wurtz renouvelle ses affirmations. À Clermont-Ferrand, à l'aide de petites boules de couleurs différentes, il montre au public comment les atomes s'agencent pour former des molécules : « J'ai construit cette formule avec des boules noires, blanches, vertes, qui représentaient les atomes de carbone, d'hydrogène, d'azote. Ils ont compris cela, ou ils ont cru comprendre, car ils ont applaudi. Je suis presque fier de ce succès pour la théorie » écrit-il à un élève.

Les partisans des poids équivalents ne peuvent plus se taire, d'autant que Wurtz, n'ayant plus la charge de doyen, a obtenu en 1875 la création d'une chaire de chimie organique à la Faculté des sciences, et qu'il doit enseigner « les théories modernes de la chimie » aux futurs chimistes. Le 9 avril 1877, le chimiste Henri Sainte-Claire Deville déclare, devant ses homologues académiciens, que la loi d'Avogadro-Ampère n'est qu'une « hypothèse pure et simple, minée par les faits et les raisonnements de toutes sortes ».

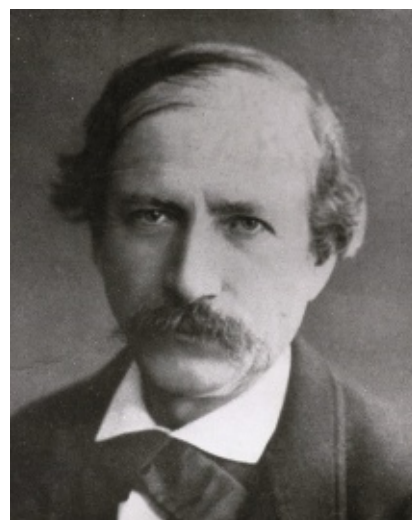
Wurtz et Sainte-Claire Deville sont amis et s'estiment. Néanmoins, Wurtz se doit de répondre et défendre la loi d'Avogadro-Ampère qui est la base de la théorie atomique. Le

7 mai 1877, à l'Académie, il montre que la loi d'Avogadro-Ampère n'est que le développement des lois dont les équivalentistes se réclament, notamment celle de Gay-Lussac.

Le 21 mai, Sainte-Claire Deville remonte à la tribune et prouve par des résultats expérimentaux que la loi d'Avogadro-Ampère ne s'applique pas à tous les éléments, notamment à la chimie minérale. En cela, il revient aux arguments de Dumas de 1836 : la loi ne s'applique pas pour le phosphore, le mercure, etc. Wurtz reconnaît alors que la loi s'applique mieux en chimie organique, mais il l'explique : la loi s'applique aux corps volatils, or certains corps minéraux se décomposent lorsqu'on les réduit en vapeur.



Le monde illustré - 24 mai 1884. Collection privée



MUSEUM NATURE COLLECTION

Peut-on fonder une science sur l'invisible ?

La discussion est purement scientifique, fondée sur les résultats d'expériences sur l'hydrate de chloral, le chlorhydrate d'ammoniaque, etc. Pourtant, Berthelot aimerait déplacer le débat du champ expérimental vers la philosophie des sciences. Une science peut-elle être fondée sur de l'hypothèse ?

Le 28 mai, il intervient dans la discussion avec la conviction qu'il va régler le conflit entre atome et équivalent. D'emblée, Berthelot place le débat sur le plan épistémologique en essayant de démontrer la confusion entre loi et hypothèse, imagination et observation. La loi d'Avogadro-Ampère, par exemple, déjà remise en question par Sainte-Claire Deville, ne peut pas être une loi puisqu'elle prétend compter des molécules et des atomes alors que ceux-ci restent invisibles.

Wurtz ne peut accepter que le débat sorte du champ expérimental. Au risque de se discréditer en tant que scientifique, il ne peut, comme dans un discours en province, avouer fonder sa pratique scientifique sur l'invisible à un moment de l'histoire des sciences où seules l'expérimentation et l'observation sont garantes de la démarche scientifique. Pour couper court à la discussion, il affirme lui aussi, mais de mauvaise foi, le caractère hypothétique de l'atome. Pour lui, seule la notation est ici en jeu. Au cas où Berthelot voudrait revenir sur le sujet, il ajoute : « Au fond de votre notation en équivalents se

cache la même idée de petites particules et vous y croyez comme nous. »

Entre le 9 avril et le 25 juin, les académiciens assistent à 16 interventions sur le sujet. Pour la première fois, il n'y a ni vainqueur ni vaincu entre Wurtz et Berthelot. Wurtz n'a pas avoué qu'il croyait à l'atome en tant qu'entité réelle et a bien montré la fécondité de la théorie atomique. Quant à Berthelot, en condamnant publiquement l'utilisation d'hypothèses dans les sciences, il peut aussi repartir en vainqueur.

Wurtz meurt en 1884. Ses plus fidèles élèves – Henninger, Friedel, Scheurer-Kestner – le suivent de peu. Berthelot subsiste. L'atome réapparaît dans les manuels scolaires en 1894. La notation atomique a presque gagné. Néanmoins, la plupart des chimistes atomistes, même parmi les élèves de Wurtz, affirment encore ne pas croire en l'existence réelle des atomes. En 1900, alors qu'il est au sommet de sa gloire et de son pouvoir, Berthelot affirme qu'il ne veut pas « que l'on croie en l'existence réelle des atomes comme on croit en l'existence de Jésus dans l'hostie consacrée ». Il finit par utiliser la notation atomique, mais meurt en 1907 sans avoir jamais cru en l'existence de l'atome, alors même que les physiciens essaient d'en comprendre la constitution et que la découverte de l'électron a déjà dix ans...

3. LE CHIMISTE CHARLES-ADOLPHE WURTZ (1817-1884) fut toute sa vie un ardent défenseur de l'idée d'une matière constituée d'atomes (*à gauche*). Il eut plusieurs adversaires, dont Marcellin Berthelot (*à droite*), qui ne pouvait concevoir une science fondée sur des éléments invisibles.

BIBLIOGRAPHIE

N. Pigeard-Micault, **Charles-Adolphe Wurtz. Un savant dans la tourmente**, Hermann/ADAPT-SNES, 2011.

C. Lécaille, **L'atome : chimère ou réalité ? Débats et combats dans la chimie du XIX^e siècle**, Vuibert/ADAPT-SNES, 2009.

B. Bensaude-Vincent et I. Stengers, **Histoire de la chimie**, La Découverte, 1993.

P. Radvanyi et M. Bordry, **Histoire d'atomes**, Belin, 1990.

☐

Depuis les premiers dés, il y a trois millénaires, l'homme imagine et fabrique des objets pour produire du hasard. A-t-il réussi ?

Jean-Paul DELAHAYE

Ce hasard, que Borges imagine, joue avec nous à chaque instant. Que savons-nous de lui ? Avons-nous la capacité de le produire et sommes-nous certains que ce que nous croyons être du hasard l'est réellement ?

Ces questions sont importantes pour assurer que les lote-

ries et les jeux sont équitables. Elles sont essentielles quand nous voulons mener des simulations et cruciales pour la mise en œuvre des méthodes mathématiques de calcul de type Monte-Carlo où la justesse et la précision du résultat dépendent de la qualité du hasard utilisé ou de certaines propriétés du pseudo-hasard mis en œuvre (voir l'article de Brian Hayes dans *Pour la Science* de décembre 2011). Enfin, en cryptographie, le hasard est au cœur de nombreuses méthodes, dont la résistance aux attaques est liée à sa plus ou moins grande perfection.

Nous aborderons ici le hasard de la physique et particulièrement celui des lancers de pièces et des dispositifs quantiques.

Tests, compression et prédiction

La théorie des probabilités contourne le problème de la définition du hasard en raisonnant sur l'ensemble des cas possibles – par exemple les six faces d'un dé – sans indiquer ce qu'est une suite aléatoire de lancers de dé ou de pile ou face. En fait, définir ce qu'est une suite aléatoire a longtemps semblé impossible. En 1965, le Suédois Per Martin-Löf a proposé une définition : une suite infinie de 0 et de 1 est aléatoire lorsqu'elle passe tous les tests statistiques raisonnables. Cette idée a été acceptée



1. Les procédés physiques macroscopiques

Les moyens physiques pour engendrer le « hasard » sont nombreux... et pas toujours équitables. On retrouve périodiquement lors de fouilles des dés romains (à gauche en bas de la page ci-contre). Les mêmes dés sont utilisés dans le jeu de Craps des pays anglo-saxons. Les roues de loterie où l'on pouvait gagner des kilos de sucre attiraient les badauds des années 1950 qui avaient été privés de sucre pendant la Seconde Guerre mondiale (on notera l'escroquerie de l'épaisseur des bandes de gain des gros montants de kilos de sucre).

La roulette et sa variante la boule sont les instruments du casino. Le rééquilibrage des roues et les plots que heurtent la bille lors de sa descente augmentent la sensibilité aux conditions initiales.

Les machines à sous, dénommées parfois bandits manchots, ont été inventées à San Francisco par Charles Fey vers 1890. Deux

méthodes différentes sont utilisées pour engendrer le hasard. Dans un premier temps, le mécanisme à produire du hasard était macroscopique et déterministe : la force avec laquelle on lançait les roues (initialement il y en avait trois) en tirant sur le bras de la machine déterminait le résultat. Le mécanisme était conçu pour qu'aucun contrôle précis ne soit possible et la machine était assimilable à une loterie ou à une roulette de casino enfermée dans une boîte. Bien sûr, des truccages mécaniques favorisant certaines combinaisons étaient possibles.

À partir des années 1960, ces machines sont devenues électroniques : un générateur algorithmique pseudo-aléatoire produit plusieurs dizaines de fois par seconde des chiffres sans jamais s'arrêter. Ces chiffres sont effacés de ses mémoires et ce n'est qu'au moment où l'utilisateur joue (en appuyant sur un bouton ou en tirant

le bras de la machine) que les derniers chiffres produits sont exploités. Ils déterminent alors une combinaison qui est affichée sur l'écran de la machine (après un délai et une animation factices) et qui fixe le résultat du jeu, provoquant, lorsque c'est nécessaire, la chute d'une quantité de pièces.

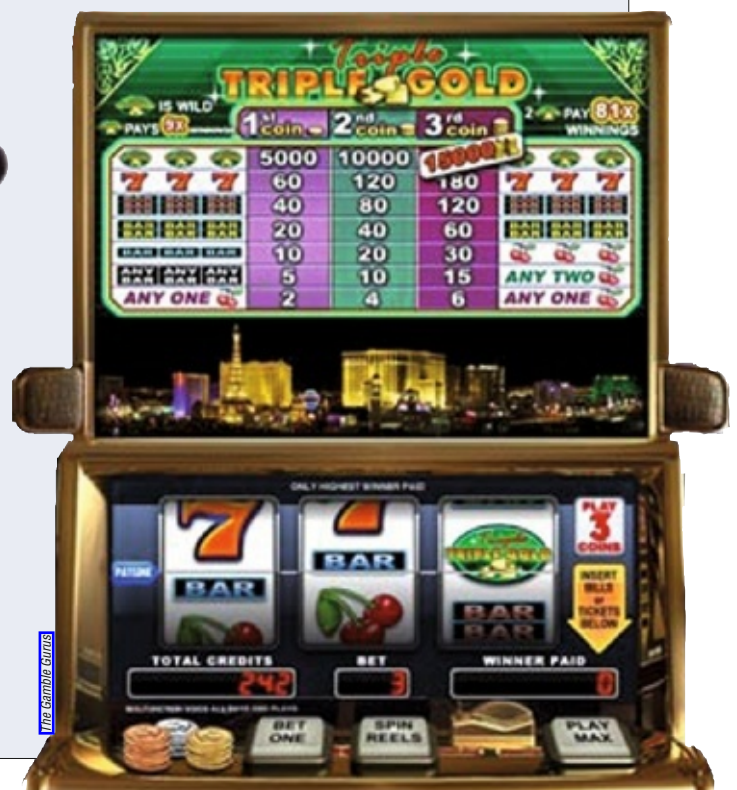
Ce procédé est-il convenable ? Si on exclut les tricheries passant inaperçues aux yeux des organismes officiels chargés de contrôler les machines, le procédé est satisfaisant aussi bien pour les joueurs que pour les propriétaires des machines.

D'une part, le propriétaire peut choisir la machine qu'il veut (ou plus tard la modifier en changeant certains composants électroniques) pour que le pourcentage d'argent redonné en moyenne aux joueurs soit celui qu'il décide (en général entre 75 % et 99 %). Ce pourcentage sert parfois d'argument publicitaire. Il peut aussi choisir une machine qui donne

souvent de petits lots et rarement des gros, ou le contraire (cela tout en respectant le pourcentage d'argent redonné en moyenne aux joueurs et fixé à l'avance).

D'autre part, une fois la machine fermée, personne ne peut tricher. Personne n'a d'informations sur l'état du générateur pseudo-aléatoire qui tourne en continu et, de plus, le geste du joueur n'est pas assez précis pour qu'il contrôle l'instant où il joue.

Le fait que ce mode de fonctionnement soit convenable pour tous ne signifie pas que le processus général du jeu produit des suites aléatoires au sens fort. En interne, il n'y a pas d'aléa puisque ce qui se passe est algorithmique. Quant au joueur, il se peut qu'il appuie inconsciemment d'une manière régulière. Rien n'assure donc que les suites de résultats d'une machine de casino soient aléatoires au sens de Martin-Löf.



2. Les algorithmes

Une multitude de méthodes ont été imaginées et mises en œuvre en informatique pour engendrer rapidement des suites pseudo-aléatoires. Avant de les utiliser, on vérifie qu'elles passent les batteries de tests comme celles du NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Il faut distinguer deux types de méthodes algorithmiques :

Les méthodes rapides

Exemple : Les générateurs congruentiels linéaires.

Trois entiers positifs a , b et c étant fixés et x_0 un entier initial choisi (on parle de germe, ou de graine), on calcule :

$$x_{n+1} = a x_n + b \text{ mod } c,$$

Cela donne une suite de nombres entiers compris entre 0 et $c - 1$, dont on extrait (en les écrivant en binaire) une suite de bits 0 ou 1.

C'est la méthode la plus courante. Si les paramètres sont bien choisis, elle donne des résultats acceptables, sauf pour les usages cryptographiques, car, connaissant quelques points de la suite, on peut en déduire assez aisément les suivants.

Les méthodes plus lentes, mais utilisables en cryptographie.

Exemple : L'algorithme BBS de Leonore et Manuel Blum et Michael Shub.

On se donne un entier positif M et une graine x_0 , et on calcule

$$x_{n+1} = x_n^2 \text{ mod } M$$

dont on ne retient que la parité (0 si on a un nombre pair, 1 sinon).

C'est un peu plus coûteux qu'un générateur congruentiel linéaire, mais, à condition de bien choisir M , on est assuré que la connaissance d'une série de bits ainsi produits ne permet pas de deviner les suivants en un temps raisonnable.

En pratique et selon les usages qu'on veut en faire, on connaît donc aujourd'hui des méthodes satisfaisantes pour engendrer plus ou moins rapidement des bits qui satisferont les batteries de test statistiques (voir l'encadré 4). En revanche, il est certain que ces méthodes, du fait qu'elles se fondent sur des algorithmes déterministes, ne donnent pas des suites aléatoires au sens fort de Martin-Löf.

quand on a montré qu'elle est équivalente à deux idées plus simples : d'une part, qu'une suite est aléatoire si elle est incompressible (impossible à représenter par un programme plus court qu'elle-même) ; d'autre part, qu'une suite est aléatoire si elle est imprévisible, aucun système de pari mécanique ne gagnant contre elle. Cette triple caractérisation mathématique d'une suite infinie aléatoire est un succès scientifique du XX^e siècle. Ainsi la suite d'« un milliard de zéros » n'est pas aléatoire, car sa définition, la phrase précédente, est bien plus courte que l'écriture du milliard de zéros de la suite ; la suite des chiffres du nombre π ne l'est pas non plus, car elle se calcule facilement et est donc prévisible.

Le cœur du problème est qu'aucun procédé algorithmique (fondé sur des programmes) ne produira un hasard véritable, car une suite calculée par un algorithme est prédictible, donc non aléatoire. Comme l'informatique n'a pas la capacité de produire du bon hasard, nous nous rabattons sur les suites produites physiquement par des dés, des lancers de pièce de monnaie, des loteries ou des dispositifs quantiques. La question se pose à nouveau : sont-elles aléatoires ?

Pièces, dés et loteries

Bien sûr, on peut tricher et piper un dé en décalant son centre de gravité par rapport au centre géométrique, le forçant à donner presque toujours 6. De même, une roulette de casino peut être déséquilibrée ou avoir des cases de profondeurs inégales qui faussent l'équiprobabilité des numéros. Exploitant cela, plusieurs joueurs auraient fait fortune ; le Britannique Joseph Jagger aurait ainsi empoché l'équivalent de plusieurs centaines de milliers d'euros à Monte-Carlo en 1873.

Peut-on piper de la même façon une pièce de monnaie pour fausser le pile ou face ? La question est intéressante, mais sa réponse exige qu'on distingue les méthodes utilisées pour lancer la pièce.

Si, après avoir lancé la pièce en l'air, vous la rattrapez dans la main (sans manipulation particulière), il semble qu'aucun moyen

ne permette de « piper » la pièce. Des expériences avec une pièce dont une face avait été recouverte d'une rondelle de balsa n'ont montré aucun biais en faveur de la face la plus légère ou la plus lourde.

En revanche, plusieurs techniques permettent de fausser l'équilibre des chances à pile ou face. Avec un peu d'entraînement, vous maîtriserez la rotation de la pièce autour de son axe et la rattraperez du côté que vous souhaitez. Si vous la faites tourner comme une toupie sur une surface plane, le tirage sera rarement équitable, car la forme du bord et l'équilibre des masses faussent l'égalité des chances des deux faces. En menant des expériences avec une pièce neuve de deux euros (belge), j'ai trouvé que le côté face était obtenu dans plus de 60 pour cent des cas. Il existerait même des pièces qui, lorsqu'on les fait tourner ainsi, donnent toujours face.

Biais de 51 pour cent

Une étude réalisée en 2007 par Persi Diaconis (le mathématicien illusionniste de l'Université de Stanford), Susan Holmes et Richard Montgomery a établi qu'une pièce de monnaie lancée en la rattrapant après qu'elle a tourné en l'air (sans manipulation délibérée du lanceur) donne un biais de 51 pour cent en faveur de la face qui est au-dessus au moment du lancer.

Ce biais a été expliqué en étudiant les équations du mouvement. Lorsque la pièce tourne parfaitement (la normale au centre de la pièce restant toujours dans un même plan), les probabilités de pile et de face sont presque identiques dès que la pièce tourne un assez grand nombre de fois (et parfaitement identiques lorsque le nombre de rotations tend vers l'infini). En revanche, pour un lancement imparfait (la normale à la pièce décrivant une courbe gauche), un biais existe en faveur du côté de la pièce initialement vers le haut. Ne pas rattraper la pièce n'est pas une solution, car lorsque la pièce frappe sur le sol, elle risque fort de se mettre à tourner comme une toupie, ce qui conduit à des biais plus importants.

La conclusion à laquelle on arrive alors est assez subtile. Si vous voulez opérer

un tirage équitable à pile ou face, deux cas sont à distinguer.

Cas 1. Vous avez confiance en celui qui lance la pièce ou vous la lancez vous-même... sans tricher. Alors la méthode consistant à rattraper la pièce dans la main assure une assez bonne équité (et une totale équité si celui qui lance ne choisit pas et ne regarde pas le côté de la pièce situé au-dessus au moment du lancer).

Cas 2. Vous n'avez pas confiance en celui qui lance la pièce. Alors vous choisissez vous-même une pièce (que vous n'avez pas testée) et demandez à votre adversaire de la lancer au sol. Même s'il existe un biais favorable à l'une des faces quand la pièce tourne, aucun d'entre vous ne saura lequel, et le tirage sera équitable.

Si aucun des joueurs n'a confiance en l'autre, une assez bonne méthode existe : les joueurs prennent chacun une pièce de leur choix ; l'un choisit « mêmes côtés » et l'autre « côtés différents » ; ils lancent chacun leur pièce et dévoilent simultanément leurs résultats. Si les pièces montrent le même côté, celui qui avait choisi cette option gagne, sinon c'est l'autre.

Notons aussi qu'une étude de Daniel Murray et Scott Teare a établi que la pièce américaine de cinq cents (le « nickel ») a une chance sur 6 000 de ne donner ni pile ni face, en tombant sur la tranche.

Casino newtonien

P. Diaconis et son équipe ont construit un dispositif mécanique de lancer de pièce qui, une fois réglé, donne le même résultat dans 100 pour cent des lancers. Il n'y a pas de surprise à cela : la mécanique newtonienne est déterministe et une bonne connaissance (ou un bon contrôle) des conditions initiales permet de calculer l'état du système quand la pièce s'est immobilisée.

En revanche, dès que le lancer est moins contrôlé et surtout si la pièce reste un long moment en l'air, il faudrait, pour effectuer une prédiction correcte, connaître les paramètres du lancer avec une précision impossible, même avec les caméras et les lasers les plus perfectionnés.

3. Pile ou... pile !

Les tirages au sort fondés sur des procédés macroscopiques pour engendrer des suites aléatoires (de, lancer de pièce, roue de loterie, roulette, tirage de cartes, etc.) cumulent les inconvénients : ils sont très lents et l'on sait, d'après la physique classique (ce que de nombreuses expériences ont confirmé), qu'ils sont fréquemment biaisés et prédictibles dès qu'on dispose de moyens de mesure suffisants.

Lorsque le mécanisme physique est compliqué et implique par exemple de nombreux chocs (pièce qui rebondit sur un sol irrégulier, boule de roulette qui cogne les petits obstacles disposés sur sa trajectoire, etc.), toute prévision des résultats devient pratiquement impossible. Cependant, cette imprévisibilité pratique ne signifie pas qu'une série de tirages sera aléatoire au sens fort, car dans un monde newtonien déterministe le hasard fort est impossible. Le dispositif de catapulte ci-contre, utilisé par Persi Diaconis pour ses expériences, lance une pièce qui tombe dans un récipient (en rouge). Quand il est réglé, tous les tirages donnent le même résultat.



4. Les tests statistiques

Les statisticiens étudient et élaborent des tests pratiques s'appliquant à une suite finie de chiffres (on ne peut pas en pratique tester des suites infinies !).

Ils indiquent, pour une suite donnée, s'il est raisonnable ou non de croire qu'elle provient d'une suite de tirages aléatoires indépendants et équitables de 0 et de 1. Une telle suite doit par exemple posséder à peu près autant de 0 que de 1. Bien sûr, elle peut avoir plus de 0 ou plus de 1, mais l'écart doit être raisonnable. Le calcul donne des informations du type :

- Si une suite de 100 bits (0 ou 1) provient de tirages indépendants et équitables, la probabilité que l'écart entre les nombres de 0 et de 1 soit supérieur à 30 est inférieure à 0,18 pour cent.
- Si une suite de 10 000 bits provient de tirages indépendants et équitables, la probabilité que l'écart entre les nombres de 0 et de 1 soit supérieur à 400 est inférieure à 0,007 pour cent.

Il est ainsi peu vraisemblable qu'une suite de 10 000 bits donnant 6 000 fois 0 et 4 000 fois 1 provienne d'une suite de tirages équitables.

Une multitude de tests de cette nature évaluent des dizaines de propriétés que doivent posséder des suites provenant de tirages indépendants et équitables. L'Institut américain de la normalisation et de la technologie, le NIST, propose une telle batterie de tests (voir <http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/mg/index.html>). Ces tests contrôlent la nature aléatoire d'une suite et repèrent les générateurs pseudo-aléatoires défectueux. Prudent dans son rapport de 2010, le NIST précise : « Aucun ensemble de tests statistiques ne peut certifier de manière absolue qu'un générateur donné est approprié à certains usages donnés. »

Malheureusement, les suites de décimales de nombres irrationnels comme π , e , $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ ou les suites de chiffres obtenus en faisant des divisions du type k/p (où p est un grand nombre premier et k un entier positif), passent tous ces tests. En pratique, ces suites ressemblent autant que possible à des suites aléatoires, mais n'en sont pas, au sens de Martin-Löf.

5. Les procédés physiques microscopiques

De nombreux modèles de petites machines à produire du hasard à partir de phénomènes microscopiques, donc d'origine quantique, sont proposés à la vente. Connectés à un ordinateur, ces appareils, comme celui de la Société genevoise *ID Quantique*, créent ce que l'informatique classique (où tout est déterministe) ne peut pas produire : de l'incertitude.

Ces appareils sont souvent présentés comme engendrant d'authentiques suites aléatoires. C'est là une affirmation discutable. En effet, si les suites produites passent les tests statistiques standards, c'est aussi le cas des décimales de π ou de nombreuses suites pseudo-alé-

atoires algorithmiques dont on sait avec certitude qu'elles ne sont pas aléatoires au sens fort.

De plus, aucun argument théorique n'assure que les suites produites sont aléatoires au sens mathématique. On considère que la mécanique quantique laisse indéterminées certaines variables et que les opérations de mesure sur de telles variables ne dépendent d'aucun paramètre caché et sont assimilables aux variables aléatoires de la théorie des probabilités. Cependant, ces hypothèses (qu'on énonce rarement clairement) n'impliquent pas que les suites de tirages obtenus par un procédé quantique sont aléatoires au sens

fort défini en 1965 par Martin-Löf, ce qui, par exemple, en assurerait l'incompressibilité. Il semble raisonnable d'avoir un peu plus confiance dans cet aléa quantique que dans l'aléa mécanique (qui est prouvé mauvais !), mais il est faux de croire qu'il correspond à l'aléa mathématique absolu.

Comme l'indique David Branning du *Trinity College* dans un récent article sur la question : « L'aléa des phénomènes quantiques peut être considéré comme une hypothèse testable de plein droit et indépendante des autres questions que posent les fondements de la théorie quantique. »



Il en résulte que les histoires de tricherie à la roulette du casino impliquant des équipes de techniciens munis d'appareils de mesure et de calcul dissimulés dans leurs vêtements sont probablement fausses. Les casinos dont la politique a toujours été de faire croire qu'il existait des martingales et des méthodes favorables aux joueurs sont heureux de laisser circuler les fables affirmant qu'on peut savoir à l'avance sur quels numéros, ou quelle zone du cylindre, la bille lancée par le croupier va s'arrêter pour peu qu'on mesure son geste et qu'on mène les bons calculs.

Claude Shannon, l'un des pères de la théorie de l'information, travailla sur un tel projet avec le grand spécialiste des jeux de casino Edward Thorp, inventeur du système de comptage qui permettait au jeu de black jack de faire basculer l'avantage en faveur du joueur. Leur système fut testé en 1961 pour la roulette et, au dire de Thorp, « un problème mineur de matériel les empêcha d'en tirer des profits », ce qui laisse penser que le problème de la précision insuffisante des mesures n'a pas été surmonté.

D'autres histoires du même type ont été racontées (par exemple dans le livre *The Newtonian Casino* de Thomas Bass) sans jamais fournir de preuve de la capacité véri-

table des systèmes cachés à prédire les numéros de la roulette.

L'article de Jaroslaw Strzalko, Juliusz Grabski et Tomasz Kapitaniak (*Pour la Science* de novembre 2009) donne des détails sur la prédictibilité des lancers de dé et sur la possibilité de les considérer comme des phénomènes chaotiques. Dans leur livre *Dynamics of Gambling Origins of Randomness in Mechanical Systems*, paru en 2009, ces spécialistes du hasard mécanique formulent la conclusion suivante, qui devrait calmer les rêveurs : « Si les données montrent que les résultats d'un lancer de pièce, de dé ou d'une roulette sont prédictibles au sens de la définition [mathématique] et que ces processus sont inéquitables, ces conclusions sont théoriques, et, en pratique, pour réussir une prévision fiable, il faut connaître les conditions initiales avec une précision inatteignable dans des expériences réelles. »

Donc, en pratique, nous ne disposons pas aujourd'hui d'une technologie permettant de prédire les résultats d'un lancer de pièce, de dé ou de roulette. Cependant, il s'agit de phénomènes prédictibles (car déterministes) et le plus souvent biaisés. Ils ne satisfont donc pas les critères mathématiques de la définition de Martin-Löf ou

les critères équivalents d'incompressibilité et d'imprédictibilité absolue.

Qu'en est-il du monde microscopique, dont les physiciens pensent très sérieusement qu'il fonctionne de manière non déterministe ?

Hasard quantique

Différentes machines sont vendues pour produire du hasard à partir de phénomènes microscopiques. Les appareils de la Société suisse *ID Quantique* exploitent un procédé d'optique quantique pour engendrer des suites aléatoires de 0 et de 1. Des photons sont envoyés un par un sur un miroir semi-transparent ; avec une probabilité égale, le photon traverse le miroir ou est réfléchi, ce qui donne 0 ou 1. Les différentes versions de leurs appareils produisent jusqu'à 4 000 000 de bits par seconde (ce qu'aucun procédé mécanique ne peut égaler).

La Société américaine *ComScire* propose un appareil qui produit seulement 2 000 000 de bits par seconde, mais en combinant plusieurs méthodes microscopiques différentes (bruit thermique, transistor saturé, etc.). À chaque fois, cependant, le principe théorique se fonde sur la nature quantique de ce qui se passe aux très petites échelles. Tous les

appareils mis en vente reposent sur l'idée que la mécanique quantique produit un hasard qui, une fois bien contrôlé (pour en équilibrer les productions), serait le hasard véritable caractérisé en 1965 par Martin-Löf et que le déterminisme de la mécanique newtonienne n'est pas en mesure d'atteindre.

Cette idée est-elle justifiée et fondée théoriquement ? La réponse n'est pas tranchée, car il n'est pas possible de tirer, des principes de la mécanique quantique, l'affirmation que les suites produites par exemple par les photons du dispositif vendu par *ID Quantique* sont aléatoires au sens de Martin-Löf. De l'indétermination concernant le passage ou non du photon à travers le miroir que la mécanique quantique exprime comme un axiome, on peut sans doute conclure que les suites produites par un tel dispositif sont semblables à celles que produisent des variables aléatoires uniformes indépendantes. Cependant, rien ne permet d'affirmer qu'une suite particulière tirée des photons (ou d'un autre procédé microscopique) est une suite aléatoire au sens de Martin-Löf : les suites provenant de tirages indépendants équilibrés ne sont pas toutes aléatoires au sens mathématique.

Il n'existe ainsi aucune méthode dont on puisse dire avec certitude qu'elle produit des suites aléatoires, et celles de la mécanique quantique ne font pas exception.

Les méthodes algorithmiques n'en produisent certainement pas et cela concerne :

- les chiffres des nombres irrationnels tels que π , $\sqrt{2}$, etc.

- les méthodes proposées dans les langages de programmation qui produisent un hasard assez bien équilibré, mais parfois prédictible et souvent imparfait quand on y regarde de près.

- les méthodes cryptographiques, qui sont conçues pour ne pas être aussi facilement prédictibles, mais qui, du fait de leur nature algorithmique, n'en donnent pas pour autant des suites aléatoires au sens absolu.

Pour les procédés mécaniques, la physique newtonienne affirme que les tirages successifs sont déterministes et, par conséquent, n'ont aucune raison de donner des suites incompressibles ou imprévisibles.

Quant aux méthodes microscopiques, rien dans les principes mêmes de la mécanique quantique ne garantit la production de véritables séquences aléatoires au sens fort. À moins de compléter les axiomes de la théorie, il n'est aujourd'hui pas justifié de dire qu'un procédé quantique produit avec une certitude absolue de l'aléa fort comme Martin-Löf l'a défini. Il faut peut-être reformuler la théorie quantique pour que cela change, mais personne pour l'instant ne le propose. Il faut donc cesser d'affirmer que les méthodes quantiques de production d'aléa sont bien fondées, à l'opposé des méthodes mécaniques ou algorithmiques.

Insaisissable hasard

Malgré tout cela, et c'est ici qu'il y a un paradoxe, pour les tests conçus depuis un siècle et qui sont soigneusement collectés, par exemple par le NIST aux États-Unis, tout semble aller très bien. Il n'y a pas de différences repérables entre les moins assurées (théoriquement) des suites pseudo-aléatoires (comme la suite des chiffres de π), les suites aléatoires mécaniques (produites avec précautions) et les suites aléatoires quantiques.

Régulièrement, certains chercheurs ont prétendu repérer et mesurer des différences entre diverses suites aléatoires (par exemple entre les chiffres de π et ceux d'autres constantes). Cependant, jamais ces affirmations n'ont été confirmées et, au contraire, on a en général découvert des erreurs méthodologiques de la part de ceux qui annonçaient avoir repéré des nuances mesurables entre suites aléatoires. Un article de George Marsaglia, grand spécialiste de l'aléa informatique, publié en 2005 conclut de manière formelle après l'utilisation des meilleures batteries de tests disponibles que les chiffres des développements de nombres irrationnels tels que π , e , $\sqrt{2}$, aussi bien d'ailleurs que ceux des nombres rationnels k/p , où p est un nombre premier assez grand, semblent se comporter comme s'ils provenaient d'une suite de tirages indépendants équitables : la théorie et la pratique divergent au maximum !

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

H. Zenil, *Randomness Through Computation : Some Answers, More Questions*, World Scientific Publishing, 2011.

B. Hayes, *Excursions quasi-aléatoires*, *Pour la Science*, décembre 2011.

A. Dasgupta, *Mathematical foundation of randomness*, dans *Philosophy of Statistics*, North-Holland, pp. 641-710, 2011 (<http://dasgupta.faculty.udmercy.edu/Dasgupta-JSfinal.pdf>).

R. Downey et D. Hirschfeld, *Algorithmic Randomness and Complexity*, Springer-Verlag, 2010.

N. Gauvrit, *Vous avez dit hasard ?*, Belin/Pour la Science, 2009.

Hasard et incertitude, *Pour la Science*, numéro spécial, novembre 2009.

J. Strzalko et al., *Dynamics of Gambling : Origins of Randomness in Mechanical Systems*, Springer, 2009.

P. Diaconis et al., *Dynamical bias in the coin toss*, *SIAM Rev.*, vol. 49, pp. 211-235, 2007.

J.-P. Delahaye, *Information, complexité et hasard*, Hermès, 2^e édition, 1999.

ART & SCIENCE

Recette pour une mosaïque romaine

Comment les motifs complexes d'une mosaïque de la villa romaine de Chedworth, en Grande-Bretagne, ont-ils été obtenus ? Par une méthode simple, également à l'œuvre dans la tradition picturale en usage dans d'autres pays.

Loïc MANGIN

En 1864, une villa romaine fut découverte à Chedworth, dans le Sud-Est de la Grande-Bretagne. Ce complexe de bâtiments, érigés autour d'une cour, a été construit à partir de l'an 120 et fut remanié jusqu'au IV^e siècle. L'ensemble est bien conservé et plusieurs pièces abritent encore de riches mosaïques. Intéressons-nous à l'une d'elles, située dans la salle à manger (*voir la figure g, page ci-contre*).

Un enchevêtrement de lignes géométriques noires sur fond blanc sinuent autour de plusieurs blocs marron et dessinent des svastikas. Ce dernier motif (une croix dont les quatre branches sont « cassées » en angle droit) est fréquent dans l'art romain. On le trouve aussi en Grèce, en Afrique du Nord, chez les Indiens Navajos, aux États-Unis, en Chine, en Inde...

Comment s'y sont pris les artisans pour composer le décor complexe ? Grâce à une analyse géométrique, Godfried Toussaint, de l'Université Harvard, aux États-Unis, et son collègue Yang Liu ont montré que les artisans ont pu obtenir les lignes noires intriquées à partir de seulement quatre courbes déformées selon un procédé simple.

L'étude est fondée sur la reconstitution de la mosaïque par l'écrivain Lewis Day, en 1903 (*voir la figure a*). Les lignes noires serpentent autour de trois types de blocs ornés d'entrelacs : un grand carré au centre, quatre rectangles et 20 petits carrés répartis en quatre groupes de cinq aux quatre coins de la mosaïque.

Au centre du grand carré, un « nœud de Salomon » enferme un svastika. Ce motif est cerné d'un guillochis (un ornement composé de lignes s'entrelaçant avec symétrie) à trois brins. Dans les carrés, trois courbes fermées s'entrecroisent, tandis que dans les rectangles, une seule courbe dessine l'entrelacs.

L'usage de courbes fermées dont l'ordonnement obéit à des contraintes est répandu dans le monde. Ainsi, les motifs de

Les motifs romains ressemblent aux figures de Kolam d'Inde du Sud et au sona d'Angola.

Chedworth ressemblent aux figures de Kolam, que les femmes de l'État du Tamil Nadu, en Inde du Sud, dessinent sur le pas de leur porte pour accueillir le visiteur ou protéger le foyer. De même, les entrelacs romains évoquent les *sona* d'Angola, qui consistent en une ou plusieurs courbes tracées par des conteurs dans le sable, autour de points régulièrement disposés. Par exemple, le nœud à trois brins de chacun des 20 carrés correspond à un *lusona* (le singulier de *sona*) à trois courbes (*voir la figure b*). Notons que l'on peut voir dans ces dessins les trajets de rayons lumineux dans une enceinte tapissée de miroirs.

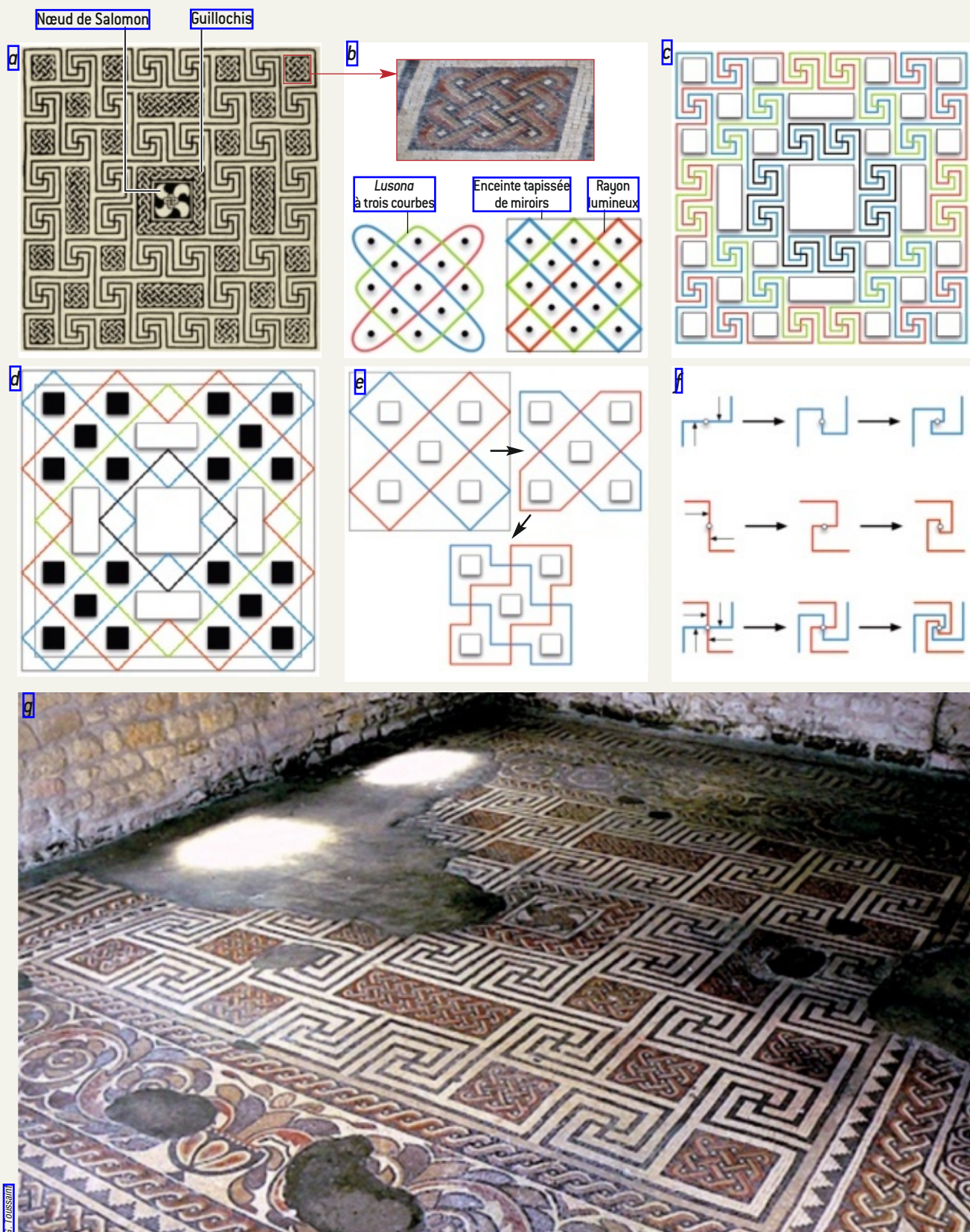
Venons-en aux lignes noires qui parcourent l'ensemble de la mosaïque. Un examen attentif révèle que quatre courbes fermées suffisent à toutes les dessiner (*voir la figure c*).

L'une (*en noir sur la figure*) reste autour du centre, une autre (*en bleu*) associe les quatre coins de la mosaïque, et deux autres encore (*en rouge et en vert*) s'entrelacent pour relier les côtés au carré central. La méthode de construction proposée par G. Toussaint et Y. Liu est fondée sur l'idée des miroirs : ils considèrent que le carré central et les rectangles sont aussi réfléchissants (*voir la figure d*). À chaque croisement de deux courbes (ou rayons lumineux) correspond, sur le motif final, un svastika.

On obtient ainsi de nombreux segments, orientés selon des diagonales, et dont les extrémités sont marquées soit par un changement de direction, soit par un croisement. Chacun de ces segments est ensuite remplacé par un angle droit (*voir la figure e*). Enfin, tous les croisements subissent une rotation (*voir la figure f*, où le motif est d'abord décomposé) de façon à obtenir le svastika souhaité. Le sens de rotation n'a pas d'importance et l'orientation d'un svastika est indépendante de celles des autres.

G. Toussaint et Y. Liu pensent que les motifs intriqués de la mosaïque de Chedworth ont pu être construits selon ce procédé. En outre, leur méthode serait utile pour classer les motifs connus, mais aussi pour restaurer les œuvres endommagées.

Y. Liu et G. Toussaint, *Unravelling Roman mosaic meander patterns : a simple algorithm for their generation*, *Journal of Mathematics and the Arts*, vol. 4, n° 1, pp. 1-11, 2010. *Mathématiques exotiques*, Dossier *Pour la Science*, n° 47, avril-juin 2005.



IDÉES DE PHYSIQUE

Comment éviter le coup de foudre

On ne peut empêcher la foudre de tomber, mais il existe un dispositif simple qui permet de guider en partie les éclairs : le paratonnerre.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

La foudre est un phénomène naturel qu'il est impossible de prévenir. Ces décharges électriques intenses peuvent tuer et occasionner des dommages considérables.

Pour s'en protéger, on utilise de longues tiges métalliques reliées au sol : les paratonnerres. Ils sont censés attirer la foudre et canaliser le courant hors de la zone à protéger. Comment fonctionnent ces dispositifs ? Quelle zone protègent-ils ?

Répondre à ces questions suppose de comprendre comment se forment les éclairs. Les éclairs sont de nature électrique, avait deviné Benjamin Franklin. Le naturaliste français Thomas-François Dalibard fut le premier à confirmer cette hypothèse, en 1752, grâce à l'observation des étincelles créées par temps d'orage par un mât métallique de dix mètres, relié à un condensateur électrique.

En fait, ni le mât de Dalibard ni plus tard le cerf-volant de Franklin n'étaient touchés par la foudre, mais ils captaient les charges électriques de l'air environnant. Franklin eut ainsi l'idée brillante des paratonnerres, dispositifs qui étaient censés décharger les nuages et empêcher la foudre de tomber. Mais les paratonnerres ne font pas exactement cela. Il est impossible de capter sans violence l'électricité des nuages et, aujourd'hui comme hier, rien ne semble empêcher la formation des éclairs. Il est en revanche possible, grâce aux paratonnerres, d'orienter partiellement leurs frappes.

La formation d'un éclair demande d'abord un nuage orageux, c'est-à-dire un nuage de grande taille où, à la suite de divers processus pas toujours bien élucidés, la partie supérieure du nuage se charge positivement tandis que sa base se charge négativement.

Par influence électrostatique, cette dernière attire au niveau du sol, qui est légèrement conducteur, des charges positives (voir la figure 1). Il se forme ainsi une sorte de condensateur géant où règnent des différences de potentiel de plusieurs dizaines de millions de volts. Avec une différence de potentiel de 100 millions de volts et le bas du nuage situé à 1 000 mètres d'altitude, on obtient des champs électriques de près de 100 000 volts par mètre.

Nuage-sol : un condensateur géant

Ce champ est 1 000 fois plus intense que par temps calme, mais reste très inférieur au champ disruptif de l'air (3,6 millions de volts par mètre, seuil au-delà duquel des arcs électriques naissent). Néanmoins, en raison des instabilités atmosphériques à la base du nuage, les charges peuvent former localement des structures conductrices courbes qui, par effet de pointe, créent des champs électriques bien supérieurs : l'air peut s'ioniser et une décharge s'amorce.

La décharge prend la forme d'un filament hautement conducteur, porteur d'une charge électrique élevée, suffisante pour entretenir l'ionisation. Environ neuf fois sur dix, ce « traceur » se perd dans un nuage voisin ; sinon, il descend vers le sol. Comme le vent chasse l'air ionisé, le traceur s'arrête quand les ions viennent à manquer, puis repart lorsque l'ionisation reprend : il avance par bonds, en zigzags, à une vitesse de quelque 200 kilomètres par seconde.

En se rapprochant du sol, les charges négatives situées à l'extrémité du traceur



1. LES ÉCLAIRS SONT DUS À DE FORTES DIFFÉRENCES DE CHARGE ÉLECTRIQUE qui apparaissent entre le haut et le bas d'un nuage, sous l'effet de processus complexes. La plupart des éclairs sont internes au nuage ou atteignent un nuage voisin, mais quelques-uns atteignent le sol.

accroissent le champ électrique. Lorsque la distance atteint quelques dizaines de mètres, ce champ est assez intense pour amorcer la formation de décharges ascendantes, depuis le sol jusqu'au traceur (voir la figure 2). Qu'un tel filament atteigne son but et voilà la base du nuage, à 100 millions de volts, reliée au sol par un conducteur : une puissante décharge électrique se développe, atteignant en une dizaine de microsecondes une intensité de 30 000 ampères. Cette intensité décroît ensuite en quelque 500 millisecondes. C'est le coup de foudre, qui engendre lumière intense et tonnerre. Et puisque le canal de décharge est ouvert entre le nuage et le sol, il peut être suivi d'autres coups.

Une méthode simple pour placer les mâts

On comprend alors que la foudre frappe préférentiellement les endroits les plus hauts, potentiellement les plus proches du traceur descendant. C'est pourquoi on dispose les paratonnerres en haut des structures. Il faut cependant évaluer la zone protégée et, pour ce faire, essayer de déterminer où des traceurs ascendants peuvent naître. La question est difficile en toute rigueur, mais une loi phénoménologique permet de résoudre le problème.

Plus la charge du traceur descendant est grande, plus la distance à partir de laquelle cette charge provoque la formation de traceurs ascendants est élevée. Cette distance est de 20 mètres pour un éclair d'un courant maximal de 3 000 ampères, de 44 mètres pour 10 000 ampères, de 200 mètres pour 100 000 ampères. C'est sur cette propriété que repose la méthode pour déterminer le placement des paratonnerres, méthode dite de la sphère roulante.

En quoi consiste cette méthode ? Imaginons une sphère dont le centre est au bout du traceur descendant et dont le rayon est égal à la distance de naissance des traceurs ascendants pour une intensité donnée (voir la figure 3). L'éclair se produira dès que cette sphère touchera le sol ou un élément relié au sol. Pour connaître les points potentiellement atteints par un éclair d'intensité donnée, il suffit donc de faire rouler une sphère

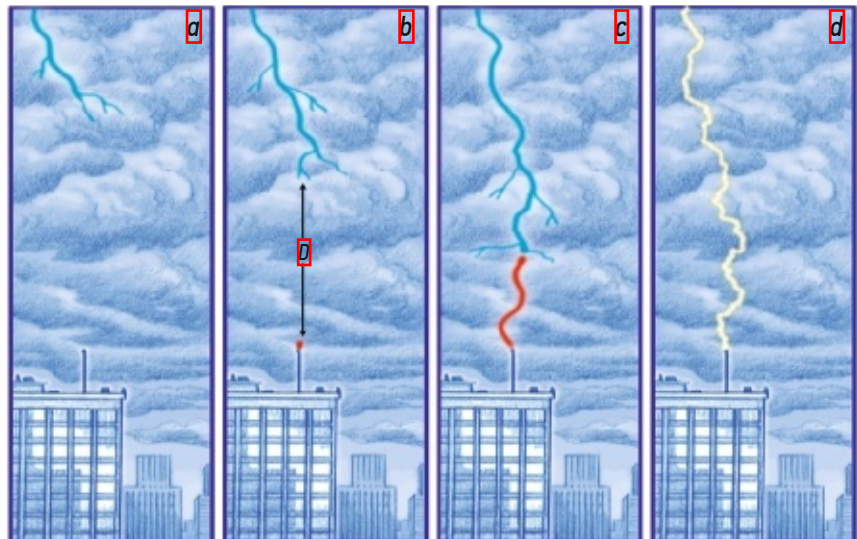
sur le sol et les obstacles présents. Tous les points que touche la sphère peuvent être atteints par la foudre, tandis que tous les autres sont dans des zones protégées.

Nous venons de raisonner sur un éclair d'intensité donnée. Cependant, puisque les éclairs d'intensité supérieure ont une distance d'action supérieure, la méthode de la sphère roulante montre que la zone que nous venons de déterminer est aussi protégée de ces éclairs plus intenses. En revanche, un éclair moins intense ayant une distance d'action plus faible, il peut atteindre

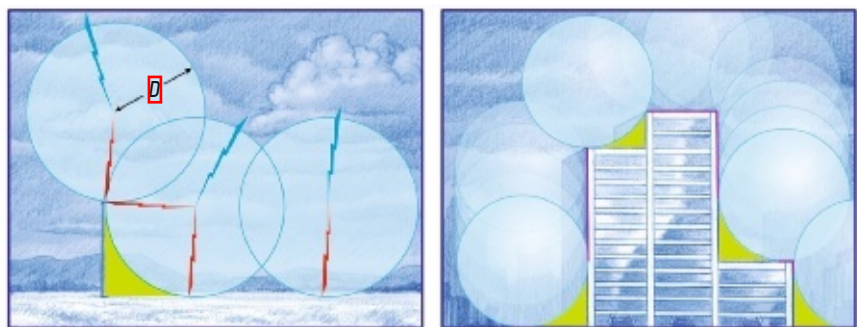
LES AUTEURS



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>



2. UN TRACEUR DESCENDANT (en bleu) provoque la formation d'un filament ascendant (en rouge) lorsque son extrémité parvient à une certaine distance D d'un objet conducteur (a, b), la valeur de D dépendant de la charge transportée. Quand le traceur descendant, chargé négativement, et le filament ascendant, chargé positivement, se rejoignent (c), un courant électrique bref et très intense circule le long du chemin frayé par les filaments de charges : c'est l'éclair (d).



3. LE FILAMENT DE CHARGES DESCENDANT (en bleu) peut faire naître un filament ascendant (en rouge) en tout point situé à moins d'une distance D de son extrémité, c'est-à-dire situé dans une sphère de rayon D et centrée sur l'extrémité du filament. Les régions (en vert) hors de portée d'une telle sphère d'influence sont donc protégées des éclairs correspondant à la valeur D ainsi que des éclairs plus puissants. Pour déterminer les régions non protégées, il suffit de faire rouler virtuellement la sphère sur toutes les surfaces et de repérer les endroits touchés par la sphère (en violet).

✓ BIBLIOGRAPHIE

Eritech Lightning Protection Handbook, 2009 : <http://www.erico.com/public/library/fep/strike/LT30373.pdf>

V. A. Rakov et M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003.

M. A. Uman et V. A. Rakov, A critical review of nonconventional approaches to lightning protection, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, pp. 1809-1820, 2002.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

des endroits qui étaient protégés pour l'intensité initiale (une petite sphère se faufile mieux qu'une grande). Autrement dit, en extérieur, on n'est jamais totalement protégé de la foudre. Tout ce que l'on peut faire est d'estimer la probabilité des éclairs en fonction de leur intensité, puis de s'assurer que l'on ne sera pas touché par des éclairs d'intensité supérieure à un certain seuil. Cela permet de dimensionner les équipements de protection en fonction du risque encouru.

Puisque le rôle des dispositifs de protection tels que les paratonnerres est d'offrir à la foudre des endroits où frapper, de nombreuses idées ont fleuri pour rendre ces endroits encore plus attractifs pour les éclairs. Le principe est d'ioniser l'air au sommet de la pointe afin de favoriser l'apparition de décharges ascendantes. Entre le début du

XX^e siècle et les années 1980, des milliers de paratonnerres à pointe radioactive ont ainsi été installés. Ils sont interdits depuis 1987, à cause du danger des radioéléments et du risque de leur dissémination (après usure des matériaux). D'ailleurs, chacun peut participer au « safari radium » qui vise à identifier tous les paratonnerres radioactifs encore présents sur les toits.

Ces mâts radioactifs sont aujourd'hui remplacés par des dispositifs électroniques qui produisent de fortes tensions électriques, avec le même espoir d'attirer les coups de foudre. Mais le filtre magique n'existe pas : les études menées jusqu'à présent sur ces dispositifs s'accordent à dire que, s'ils ont le grand mérite d'être bien moins dangereux que les pointes radioactives, ils ne sont pas plus efficaces qu'une simple pointe.

france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélie Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

Photo: Nati Bourge © Arnaud Ravetti. Courtesy: gawie kassie - 42497 - Mars 2011

SCIENCE & GASTRONOMIE

L'eau et le feu des piments

Ce n'est pas en buvant de l'eau que l'on éteint le feu du piment. Pis, c'est quand il pleut beaucoup que les piments sont piquants !

Hervé THIS



Le piment est le fruit de plantes du genre *Capsicum* (famille des Solanacées) dont le bassin semble être la Bolivie. Le composé principal de son piquant est la capsaïcine, isolée au début du XIX^e siècle par les chimistes Bucholz et Braconnot. Boire de l'eau pour faire cesser la brûlure du piment est inutile. La capsaïcine n'est en effet pas soluble dans l'eau, mais dans les graisses : mieux vaut se rincer la bouche avec de l'huile ou du lait, qui contient de la matière grasse émulsionnée.

Les biologistes viennent de découvrir que l'eau est responsable du piquant des piments ! L'histoire commence avec des questions de biologie de l'évolution. L'hétérogénéité de l'environnement détermine-t-elle des variations persistantes de certains traits ? Pour tester cette hypothèse, les biologistes recherchent des populations naturelles d'organismes vivants pour lesquels la variation des traits est clairement liée à un changement environnemental.

Les variations de l'expression de défenses chimiques des plantes ont été considérées comme un modèle intéressant, car le bénéfice écologique se mesure facilement et le coût physiologique apparaît nettement. David Haak et Joshua Tewksbury, à Seattle, et leurs collègues ont examiné diverses espèces de piments dont les gènes codent la production de composés capsinoïdes dans les fruits.

Certains piments (*Capsicum chilli*) n'ont aucun piquant, alors que d'autres (*Capsicum annuum*) ont des fruits tous brûlants. Les biologistes américains ont exploré le Sud-Est de la Bolivie, qui est le centre de la diversité des piments sauvages. Trois espèces de *Capsicum* y coexistent et présentent un poly-

morphisme du piquant : deux plants voisins de la même espèce peuvent produire soit des fruits piquants, soit des fruits non piquants.

Or les plantes produisant des capsinoïdes résistent aux attaques de champignons microscopiques de type *Fusarium*. Les biologistes américains se sont alors demandé pourquoi tous les piments ne sont pas piquants. Ils ont examiné les variations de piquant dans 21 populations réparties sur une distance de 300 kilomètres, où s'établit un gradient d'humidité du climat. Dans le Nord-Est sec, 15 à 20 pour cent des plants de *Capsicum* produisent des fruits piquants, et la proportion d'« individus piquants » augmente vers le Sud-Ouest, plus humide, où 100 pour cent produisent des piments piquants.

Au cours des sept années de l'étude, avec récolte de fruits et de semences, et culture en serre des semences recueillies (avec peu ou beaucoup d'eau), les biologistes ont ainsi relié les proportions de fruits piquants et la quantité d'eau dont disposent les plantes.

Les variations annuelles des pluies modifient les proportions d'individus piquants ou non dans chaque population. La proportion d'individus piquants reste partout corrélée à l'humidité. Selon que les individus sont piquants ou non, la densité de stomates (pores dans les feuilles, qui règlent notamment les échanges d'eau) varie. Les piments non piquants, qui ont moins de stomates sur les feuilles et qui produisent deux fois plus de graines, se trouvent surtout dans les parties sèches du domaine étudié. La présence de capsinoïdes y est moins utile, le *Fusarium* étant moins présent.

Ainsi, les variations environnementales se sont accompagnées d'un polymorphisme

du piquant dans les populations naturelles de piment sauvage *Capsicum chacoense*, parce que les particularités physiologiques relatives à l'utilisation de l'eau sont mêlées à celles qui commandent le piquant, à savoir la production de capsinoïdes.

Dans les environnements les plus humides, le piquant est utile aux plantes, les capsinoïdes protégeant les fruits des champignons qui les attaqueraient. L'adaptation n'est pas coûteuse : les piments piquants et non piquants cultivés dans ces conditions produisent autant de graines (où les capsinoïdes sont présents). Dans les environnements plus secs, le piquant est moins utile, le risque d'attaque par des champignons étant inférieur, et la production de composés piquants est coûteuse, car la production de graines est réduite de 50 pour cent. L'hypothèse biologique est ainsi avérée pour ce cas particulier, et les agriculteurs savent maintenant comment nous faire ou non brûler la bouche : en réglant la quantité d'eau donnée aux plantes.

Simultanément, le cuisinier sait comment éviter les contaminations par des champignons : utiliser des piments piquants... et pourquoi pas des capsinoïdes purs, en solution dans l'huile ? Imitons la nature, où l'évolution a travaillé pour nous.



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).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ ARCHÉOLOGIE

L'archéologie cognitive

Sous la direction
de René Treuil

Maison des sciences
de l'homme, 2011
(286 pages, 21 euros)

La « jointée », qui consiste à joindre les deux mains en coupe pour y faire tenir de l'eau ou des grains, est apparemment un geste universel. Naturel aussi ? Il ne faut pas répondre trop vite. Les mains, ainsi réunies, évoquent un récipient. Dans sa contribution, F. Sigaut estime que l'invention du récipient a pu précéder la jonction des mains en coupe. La jointée serait une imitation du récipient. Si tel fut bien le cas, c'est un geste outillé.

Le coup de poing offre le même genre de surprise. Il n'est pas universel (on le trouve surtout en Europe). Il semble absent chez les singes, qui se blessaient s'ils l'employaient. C'est un geste outillé, car il ne peut guère se faire à poings nus. Or l'usage de percuteurs pour casser des noix est connu des chimpanzés. Il ne faut donc pas considérer le percuteur de pierre ou de bois comme un prolongement du poing humain.



C'est au contraire le poing qui est une imitation, ou plutôt une incorporation, du percuteur.

Ces exemples illustrent à quel point déduire les aptitudes des hommes de la Préhistoire (ou les mentalités de sociétés plus récentes) à partir de leurs traces matérielles est délicat. Telle est néanmoins la tâche de l'archéologie cognitive. Ce livre rejette la division entre intelligence conceptuelle et intelligence pratique, qui privilégie toujours la première au détriment de la seconde, et il rend sa dignité au geste technique. Toute intelligence pratique est aussi conceptuelle.

Certains faits sont émouvants, comme celui-ci, rapporté par Nicole Pigeot. L'étude des pierres taillées laissées par les apprentis magdaléniens révèle qu'ils acquiesçaient vite les grands principes stratégiques du schème technique, mais qu'ils ne savaient pas quand s'arrêter : ils s'obstinaient lors même que rectifier une taille commencée de travers n'était plus possible. Mais nous avons tous été des apprentis magdaléniens ! Repérer le moment où un travail est fini, ou comprendre qu'il est engagé dans une direction sans issue, exige d'avoir du métier. Un maître, à qui on demandait quand s'achevait l'initiation d'un compagnon, répondit : « Quand le compagnon sait faire ce qu'il n'a pas appris à faire. » N. Pigeot a raison, je crois, de ne pas préciser le domaine d'activité du maître, car la réponse vaut pour tous les apprentissages, les nôtres comme ceux des Magdaléniens. À explorer les confins du connaissable, ce livre parle de nous. Alors, il captive le lecteur profane, même si la plupart des questions posées risquent de rester à jamais sans réponse.

→ Didier Nordon

→ MATHÉMATIQUES

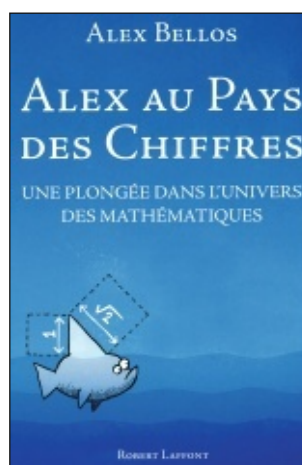
Alex au Pays des Chiffres

Alex Bellos

Robert Laffont, 2011
(504 pages, 23 euros)

Les mathématiques sont dans la vie. Cet ouvrage le rend sensible par une somme amusante d'anecdotes, que les amateurs de mathématiques dégusteront avec plaisir.

L'auteur suit plus ou moins le développement des mathématiques depuis les plus hautes an-



tiquités chinoise et grecque jusqu'à nos jours. Il voyage aussi et parcourt le monde en s'arrêtant ici ou là pour comprendre ce qui a fait naître les nombres et les façons de les écrire. Il raconte ainsi l'histoire du zéro, ce « chiffre arabe » inventé par les Indiens, de π et la quête des experts de ce nombre transcendant qui savent aujourd'hui le calculer avec des milliards de milliards de décimales...

Il s'intéresse aussi au nombre infini des pavages, problème qui est assez simple dans le plan, et à la fois plus simple et plus compliqué dans l'espace où l'on est limité par le nombre de polyèdres réguliers. Sont évoqués les moyens de calcul, tels les logarithmes et les

règles à calcul rendues obsolètes par les calculateurs électroniques. Comme toujours, l'infini est partout et aussi dans ce livre même si, depuis Gödel, il faut parler d'infinis classables et hiérarchisables. Ainsi, l'auteur explique à la fin du livre au lecteur pourquoi, dans un hôtel ayant un nombre infini de chambres, il risque aussi de ne pas trouver de place... Sans doute parmi les plus difficiles à comprendre, ses chapitres sur les statistiques ne laissent pas le chaos de côté...

Un glossaire et un index permettent de lire comme les oiseaux picorent. Les textes sont si agréables et si bien traduits que l'on en vient naturellement... à comprendre. Que dire encore ? Rien : laissons le mot de la fin à mon confrère Cédric Villani : *À la fois livre scientifique et conte merveilleux Les Aventures d'Alex vous combleront ! S'il le dit.*

→ Gérard Tronel
UPMC, Paris

→ PRÉHISTOIRE

L'abbé Breuil. Le pape de la préhistoire

Jacques Arnould

CLD Éditions, 2011
(334 pages, 21 euros)

L'abbé Breuil. Un préhistorien dans le siècle

Arnaud Hurel,

CNRS Éditions, 2011
(452 pages, 28 euros)

À l'occasion du cinquante-naire de sa mort, deux biographies sont consacrées à Henri Breuil (1877-1961), qui marqua la préhistoire française d'une telle empreinte qu'il en fut surnommé le pape, comme le rappelle J. Arnould.

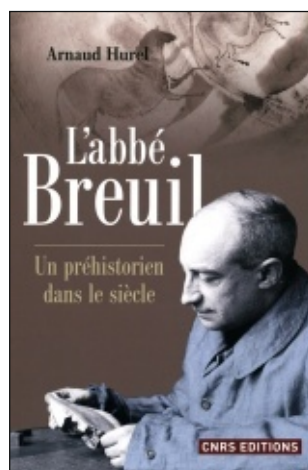


Pour raconter la vie de ce grand scientifique, ses biographes ont choisi des approches un peu différentes : A. Hurel examine les contributions scientifiques de l'abbé Breuil avec un grand luxe de détails, en s'appuyant sur une énorme documentation, mais en restant toujours agréable à lire. J. Arnould met davantage l'accent sur la vie personnelle du préhistorien et ses voyages à travers le monde, en enrichissant son livre d'anecdotes. Les portraits qu'ils nous livrent concordent pour l'essentiel, en nous montrant un prêtre atypique, qui n'eut jamais la charge d'une cure, et fit preuve d'une constante détermination à poursuivre une remarquable carrière scientifique, avec un individualisme devenu aujourd'hui difficile à maintenir dans le milieu de la recherche – ce qui ne l'empêcha d'ailleurs pas de contribuer à l'institutionnalisation de la préhistoire lors de la fondation de l'Institut de paléontologie humaine.

Pour le grand public, l'abbé Breuil a été avant tout celui qui a révélé l'art pariétal paléolithique, d'Altamira à Lascaux en passant par tant d'autres grottes ornées où, avec un indéniable talent artistique, il a passé de longues journées à relever peintures et gra-

vures laissées par les hommes préhistoriques. Mais, comme nous l'indiquent ses deux biographies, il est aussi celui qui, au début du XX^e siècle, contribua magistralement à démêler la complexité des cultures du Paléolithique supérieur, lors de ce que l'on a appelé la « bataille de l'Aurignacien ». J. Arnould et A. Hurel ne manquent pas non plus de rappeler le cadre assez conflictuel dans lequel l'abbé Breuil fit ses premières armes à la fois en préhistoire et dans l'Église, à une époque où l'anticléricalisme était militant et où la hiérarchie catholique voyait d'un très mauvais œil les tendances « modernistes ». Tout en s'efforçant de faire reconnaître par les instances religieuses, et cela jusqu'au niveau de la papauté, le bien-fondé des recherches préhistoriques, Breuil ne fut jamais tenté par les spéculations métaphysiques qui coûtèrent si cher à son ami Teilhard de Chardin.

Un demi-siècle après sa disparition, nombre d'interprétations de l'abbé Breuil, notamment celle



de l'art pariétal, ont fait l'objet de critiques ou de révisions par de nouvelles générations de préhistoriens. Son rôle n'en demeure pas moins incontestable, comme en témoignent, avec des tons différents

mais des conclusions convergentes, ces deux bons biographes.

→ Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

→ ÉCOLOGIE

Poissons d'Afrique et peuples de l'eau

D. Paugy, C. Lévêque, I. Mouas

IRD Éditions, 2011

(319 pages, 48 euros).

Ce beau livre passionnera tant les connaisseurs de l'Afrique que ceux qui en ignorent tout. Il traite des poissons d'eau douce ainsi que des sociétés qui les pêchent en Afrique et à Madagascar. Outre la documentation, son équipe d'auteurs comprend deux écologues grands connaisseurs du sujet et de la gestion de cette ressource si vitale pour les Africains.

L'ichtyologie des poissons africains d'eau douce étant récente, aucun ouvrage accessible n'existait jusqu'à présent qui leur soit consacré. Celui-ci donne une vision d'ensemble non seulement de ces poissons, mais aussi de leurs pêches et des peuples qui les pratiquent, dans leurs contextes historiques et géographiques. Sans être excessive, une abondance de cartes et de graphiques y soutiennent heureusement le propos.

Chercheurs de terrain, les auteurs ont aussi réalisé une ethnologie des peuples de l'eau, illustrée par de nombreux témoignages des pêcheurs qui leur ont donné leurs savoirs et expliqué leurs savoir-faire. Le lecteur découvre ainsi la diversité et l'histoire des peuples de l'eau africains, et comprend que les poissons et les animaux aquatiques sont omniprésents tant dans leur

Brèves

JUSTIFIER EN MATHÉMATIQUES

D. Flament, Ph. Nabonnand (dir.)
Maison des sciences de l'homme, 2011
(372 pages, 29 euros).

Justifier, en mathématiques, ne se réduit pas à démontrer. Il s'agit aussi de convaincre le lecteur de l'intérêt des notions introduites. Ce livre, qui porte sur l'histoire des mathématiques au XIX^e siècle, expose les réserves d'Hermite face aux excès de la rigueur ; les tentatives de Hamilton de fonder l'algèbre sur la notion de temps... Un livre savant, destiné au public intéressé par les mathématiques.



ARCHÉOLOGIE, SCIENCE HUMAINE

Jean Guilaine, entretiens avec Anne Lehoërf
Errance, 2011
(240 pages, 22 euros).

Le grand archéologue du Néolithique qu'est Jean Guilaine nous communique ici sa conviction sur la nature de l'archéologie, mais aussi la vision qu'il a aujourd'hui de cette science qui a tant changé en 50 ans, ainsi que la façon dont il voit son avenir.

AVENTURES DANS L'ESPACE

Jean-François Pellerin
A2C Medias, 2012
(222 pages, 20 euros).



Envie d'espace ? D'aventure ? Sur votre canapé ? Voilà la lecture idéale. Dans un style fluide et agréable, l'auteur retrace l'incroyable somme de génie, de travail et d'héroïsme qui a rendu possibles les incursions de l'homme dans l'espace au XX^e siècle. Chacun des épisodes se lit seul. Leur ensemble donne du recul en cette époque où, après ses efforts pionniers, l'humanité se prépare à s'implanter dans l'espace.

Brèves

POUR UN MONDE SANS SIDA

Françoise Barré-Sinoussi
Albin Michel, 2012
(180 pages, 17,50 euros).



Trente ans après l'identification du virus du sida, l'auteur, co-lauréate du prix Nobel de médecine en 2008 pour cette découverte, revient sur l'histoire du sida. Des débuts de l'épidémie aux pistes actuelles de thérapie et de prévention, elle retrace avec clarté, sous forme d'entretien, les recherches, collaborations et engagements qui jalonnent cette lutte.

MAKAY

Evrard Wendenbaum
La Martinière, 2011
(176 pages, 32 euros).



Le massif du Makay, au Sud-Ouest de Madagascar, recèle, dans ses profondes crevasses et vallées, des écosystèmes luxuriants, isolés depuis plusieurs millions d'années. Explorateur, photographe et cinéaste, l'auteur relate les expéditions scientifiques qu'il y a menées en 2010-2011. Magnifiquement illustré, l'ouvrage révèle tant la beauté et la diversité de ces lieux que les dangers qui les menacent. Un documentaire en 3D est aussi disponible en DVD et Blu-ray.



NOS ALIMENTS SONT-ILS DANGEREUX?

Pierre Feillet
Quæ, 2012
(240 pages, 22 euros).

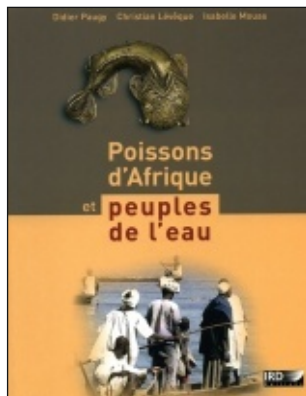
Le régime crétois est-il la panacée? Les aliments sont-ils cancérigènes? Que sont devenues les vaches folles? Quelle quantité de pesticides consomment-on? Y a-t-il des OGM dans nos assiettes? Demain, comment mangerons-nous? En 60 points, l'auteur, chercheur à l'Institut national de la recherche agronomique, répond aux nombreuses interrogations qui entourent l'alimentation aujourd'hui.

vie quotidienne que dans leur vie spirituelle et religieuse, même s'ils ne sont plus sacrés comme avant.

Il entendra aussi parler dans cet ouvrage des « grands ancêtres » et même de l'« histoire familiale » des poissons africains, marquée par une dispersion qui entraîne des diversifications. Cela permet de comprendre leur phylogénie et de suivre les auteurs quand ils se demandent si, en plus d'être le berceau de l'humanité, l'Afrique ne serait d'une certaine façon celui des poissons.

Tant ces connaissances que cette expérience jouent un rôle important dans la mise au point d'une bonne gestion de cette ressource dans le contexte contemporain d'évolution des techniques de pêche. L'enjeu est important, car plusieurs espèces de poissons sont une part essentielle de l'alimentation de la population africaine, tandis que d'autres sont devenues l'objet d'un intense commerce international. Les auteurs discutent aussi des problèmes posés par l'évolution de la biodiversité, par la pisciculture et par les politiques africaines de gestion des milieux aquatiques. Ils n'oublient pas les poissons d'aquarium, eux aussi objets d'un grand commerce.

Les Français savent-ils qu'une bonne part du poisson qu'ils consomment de plus en plus est importée d'Afrique? Ce livre est



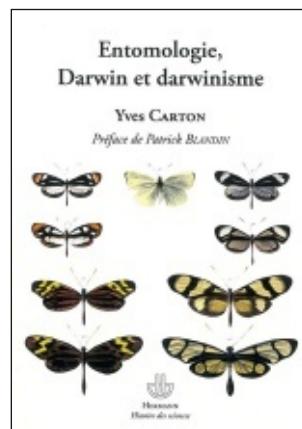
une occasion d'en connaître l'origine et même d'apprendre à les cuisiner!

→ Alette Geistdoerfer
MNHN, Paris

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Entomologie, Darwin et darwinisme

Y. Carton
Hermann, 2011
(300 pages, 23 euros).



À l'origine de travaux sur le développement de résistance aux parasitoïdes au niveau moléculaire, génétique et populationnel, Y. Carton nous offre ici un ouvrage très original sur les rapports complexes qu'ont entretenus Darwin, les insectes et les entomologistes.

Sa première partie est consacrée à la formation entomologique de Darwin et à la grande place qu'occupe cette discipline dans ses écrits. Après avoir décrit les origines de cette passion qui remonte à l'enfance, l'auteur évoque les chasses aux insectes de Darwin durant les nombreuses escales du *Beagle*, puis les observations faites à Down House, la maison où Darwin passe le reste de sa vie.

Dans la deuxième partie, Y. Carton change de perspective: il aborde la réception des écrits de Darwin par les entomologistes britanniques. Dès la parution de *L'Origine des espèces*, en 1859, ses travaux sont activement débattus et, si Darwin rencontre de vigoureux opposants, il reçoit un appui efficace et indéfectible d'entomologistes éminents tels Wallace, Bates, Lubbock

et Trimen. Certains d'entre eux lui fourniront quelques-uns des meilleurs exemples pour étayer sa théorie sur la sélection naturelle.

Enfin, dans un troisième temps, l'auteur nous fait découvrir le particularisme français qui est aussi l'histoire d'un ratage: à quelques exceptions près, tels Georges Bernadi ou Paul Marchal, les scientifiques de notre pays se sont révélés incapables de comprendre le darwinisme et d'en accepter les conséquences. Avec un rare entêtement durant plus d'un siècle, ils se sont montrés réfractaires à la théorie darwinienne.

Y. Carton nous offre ici un remarquable livre pour décrire comment une idée peut être débattue, combattue, réfutée ou acceptée dans une communauté scientifique. Sa brillante utilisation d'extraits d'ouvrages, d'articles, de conférences et de lettres, fait revivre le petit peuple des entomologistes; elle nous permet de partager leurs passions et nous fait mesurer l'ampleur de certains de leurs errements.

→ Valérie Chansigaud
Historienne des sciences de l'environnement



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