

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 2012 - n° 419

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le boson de Higgs

Un nouveau départ pour la physique ?

Les salpes

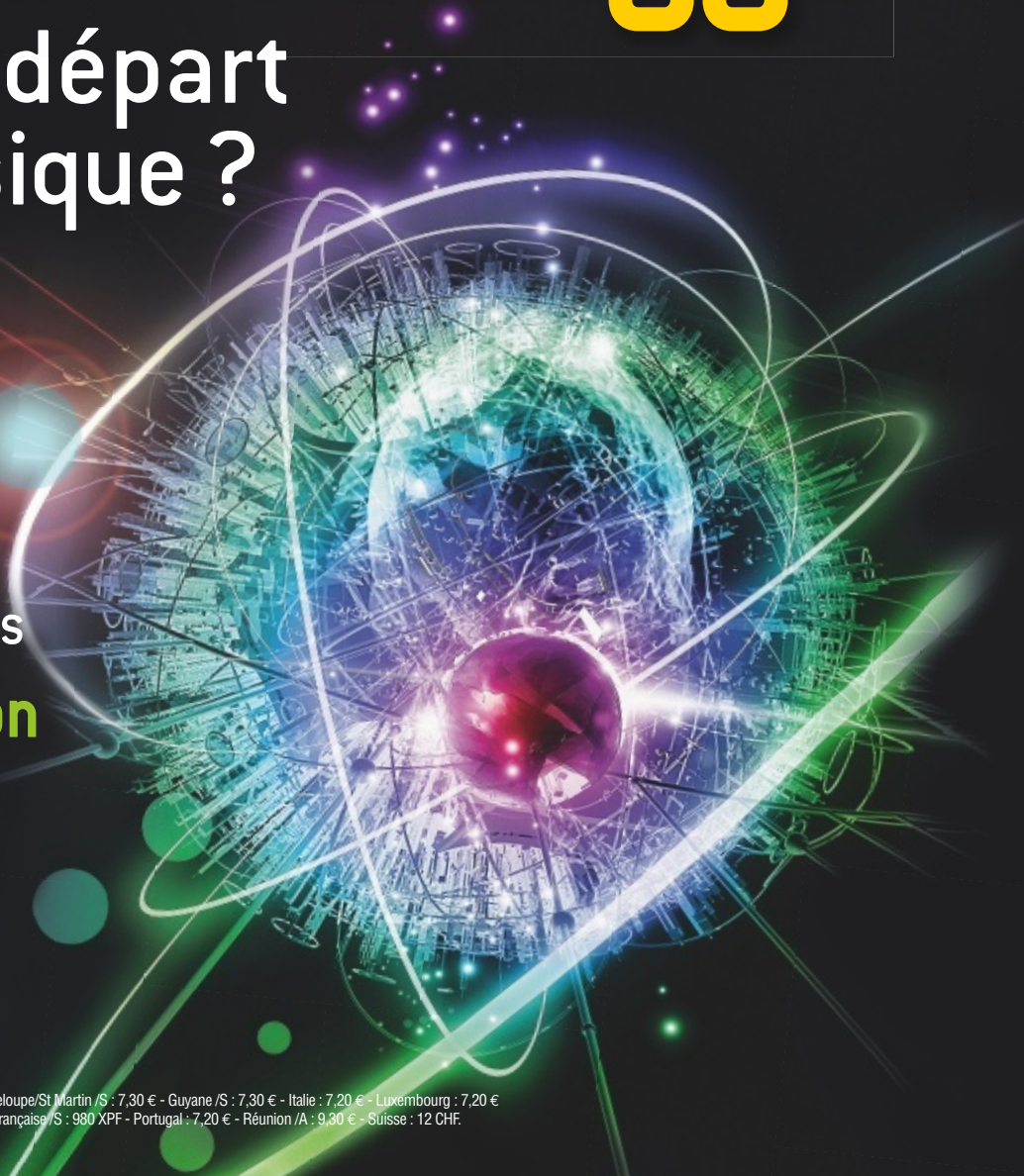
Un plancton marin expert de la filtration

Paver le rectangle

Des puzzles de polyminos

Télescopes en ballon

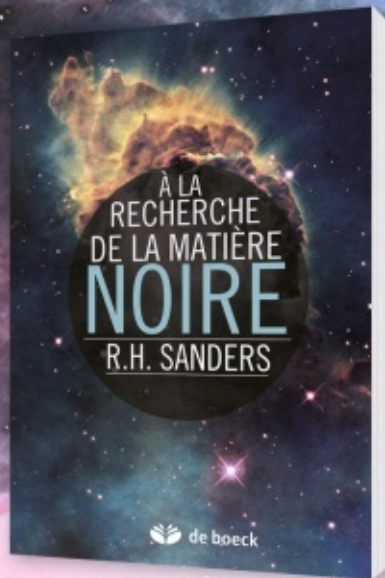
L'Univers observé depuis la haute atmosphère



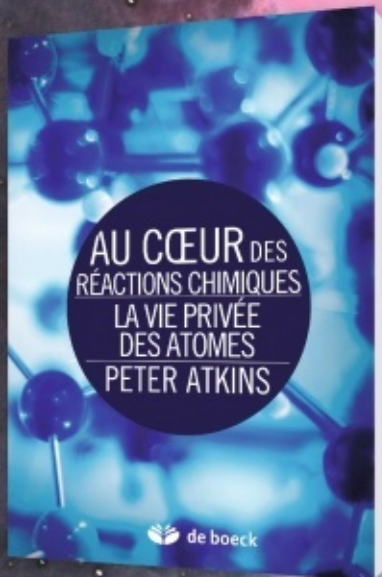
M 02687 - 419 - F: 6,20 €



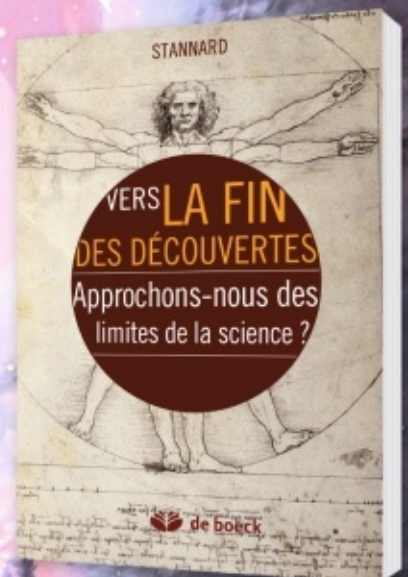
À LA RECHERCHE DE
LA MATIÈRE NOIRE



APPROCHONS-NOUS
DES LIMITES DE
LA SCIENCE ?



AU COEUR DE L'UNIVERS



LA VIE PRIVÉE
DES ATOMES



DÉCOUVRONS
L'UNIVERS !

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 Billbault, 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 : Romain Amiot,
Daisy Bonnard, Antoine Browaeys, Françoise Combes,
Cécile Fourrage, Sophie Gallé-Soas, Édouard Gentaz,
Hubert Guimet, Laurent Keller, Frédéric Nowacki,
Frédéric Parrenin, Gilles Peltier, Christophe Pichon,
Daniel Tacquenot, Richard Taillet.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 • 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

Tel : 04 88 15 12 41

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

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

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief: Mariette DiChristina. Editors: Ricky Ruting, 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].



de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Succès médiatisés

La science a été à l'honneur cet été dans les médias. D'abord, ce fut la confirmation de l'existence du boson de Higgs. Puis le robot *Curiosity* s'est posé sur Mars après un périple interplanétaire d'un peu plus de huit mois. Les résultats scientifiques ont rarement un tel écho. Est-ce en raison de la relative accalmie des informations politiques, économiques et sociales due à la trêve estivale ? Est-ce parce que l'exploration spatiale, et notamment la recherche de traces de vie sur la planète rouge, fait rêver tout un chacun ? Quant au succès du boson de Higgs, est-il dû au soulagement qui a accompagné sa découverte ?

Si l'on comprend facilement l'un des principaux enjeux de *Curiosity*, le sens de la découverte du boson de Higgs est sans doute plus sibyllin pour le non-physicien. Cette particule, prévue par la théorie du « modèle standard », confère leur masse aux autres particules élémentaires. Et face aux difficultés que représente l'explication des concepts scientifiques complexes, quoi de plus efficace qu'une métaphore ? Celle d'un

Quoi de plus efficace qu'une métaphore ?

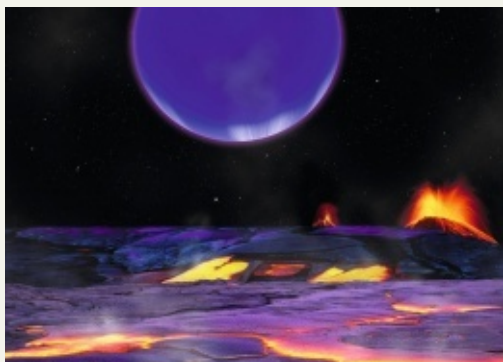
personnage se déplaçant sur un champ de neige est particulièrement élégante : avec des skis qui glissent sans frottements, le skieur n'interagit pas avec la neige, ce qui correspondrait à une particule sans masse (c'est le cas du photon) ; quand le personnage porte des raquettes, l'interaction augmente, et c'est comme s'il acquerrait une faible masse (l'électron). La masse augmente encore quand l'interaction se renforce, ce qui est le cas si le sujet n'a que ses chaussures aux pieds.

L'effervescence de la découverte retombée, se pose la question : le boson de Higgs, et après ? Le boson existe, ou comme préfèrent le dire les physiciens, le boson existerait avec un degré de confiance de... 99,9999 pour cent. Étape indispensable pour valider la théorie du modèle standard, mais étape seulement, même si elle a demandé beaucoup de temps, de compétences, d'énergie et de capitaux. Maintenant, en étudiant le boson découvert, les physiciens espèrent répondre à d'autres questions ouvertes liées à la supersymétrie, la matière noire, ou l'antimatière, ce qui leur permettra d'écrire une nouvelle physique, dite au-delà du modèle standard (voir le dossier page 22).

En physique des particules, comme dans tous les domaines scientifiques, une réponse à une question autorise seulement de progresser d'une case dans le champ des questions ouvertes. Encore faut-il savoir si l'on avance avec des skis bien frottés, des raquettes ou... pieds nus !

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

Actualités

6 **Des cellules souches dans les tumeurs**8 **Des exoplanètes si proches et si différentes**9 **Aux sources des points chauds**12 **Une vallée sous la glace en Antarctique**

... et bien d'autres sujets.

14 **ON EN REPARLE**

Opinions

16 **POINT DE VUE****La Réunion : une chasse aux requins inutile***Antonin Blaison*17 **DÉVELOPPEMENT DURABLE****Vers un ciment durable : partir de l'échelle atomique***Roland Pellenq*20 **COURRIER DES LECTEURS**21 **VRAI OU FAUX****Les cigarettes *light* sont-elles moins toxiques ?***Guillaume Jacquemont*

Ce numéro comporte un encart des Editions Faton posé en 4^{ème} de couverture de l'édition abonnés France, deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage et une offre spéciale étudiant en p. 91.
En couverture : © Kenn Brown/Mondolithic Studios

À LA UNE

DOSSIER

La saga du boson de Higgs

Particule prédite par les théoriciens il y a un demi-siècle, le boson de Higgs a enfin été découvert. Pourquoi cet événement est-il si important et qu'augure-t-il pour la physique des particules ? Réponses dans ce dossier.

22 **Cent ans de particules***Jeremy Bernstein*30 **Le boson de Higgs, et après ?***John Ellis*36 **BIOLOGIE MARINE**
Les salpes, reines du plancton marin*Jean-Claude Braconnot*

Les salpes, une des formes les plus abondantes de plancton animal, filtrent l'eau de mer à une vitesse remarquable. Cette propriété leur confère un rôle important dans le fonctionnement du milieu marin.

44 **TECHNOLOGIE SPATIALE**
L'astronomie en ballon*Françoise Delcelier-Douchin*

L'arsenal des astronomes ne se limite pas aux télescopes terrestres et spatiaux. Les ballons stratosphériques permettent aussi de réaliser des observations précises.

52 **PALÉONTOLOGIE** Les dinosaures du continent perdu

Scott Sampson

Des faunes distinctes de dinosaures semblent avoir vécu sur l'ancien continent de Laramidia, en Amérique du Nord. Comment ont-elles coexisté sans se mélanger ? Et comment une terre aussi petite a-t-elle pu nourrir autant d'espèces de grande taille ?



60 **ÉNERGIE** Microalgues : les carburants du futur ?

Philip Pienkos, Lieve Laurens et Andy Aden

Les algues microscopiques pourraient fournir presque autant de biocarburants que les plantes terrestres. Il reste à les rendre compétitives avec les carburants fossiles.



68 **PSYCHOLOGIE SOCIALE** Les cinq piliers de l'entraide

Martin Nowak

La coopération est répandue dans le monde animal. Elle se serait imposée grâce à cinq stratégies distinctes que peuvent adopter les individus.

Regards

74 **HISTOIRE DES SCIENCES**

La formule secrète du bleu outremer

Bernard Valeur

Le prix du bleu outremer dépassait celui de l'or jusqu'à ce qu'on en fasse la synthèse en 1826. L'origine exacte de cette superbe couleur bleue ne fut comprise qu'en 1970.

80 **LOGIQUE & CALCUL**

Les plaisirs du rectangle

Jean-Paul Delahaye

Trois mille ans de géométrie n'ont pas épuisé tout ce qu'un mathématicien peut dire de l'élémentaire figure géométrique du rectangle.

86 **ART & SCIENCE**

La table qui se prenait pour un manuel de géologie

Loïc Mangin

88 **IDÉES DE PHYSIQUE**

Le propulseur électromagnétique

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

93 **SCIENCE & GASTRONOMIE**

De l'usage raisonné des fibres

Hervé This

94 **À LIRE**

Rendez-vous sur

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence
de l'actualité scientifique internationale

■ Toutes les sciences en un clic

- Des actualités quotidiennes
- Des articles en libre accès
- Votre magazine numérique en ligne*
- Plus de 8 ans d'archives*

■ Des services exclusifs

- Les réactions aux articles**
- Des offres d'emplois scientifiques
- Des newsletters**
- Un espace abonnement

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

** En créant votre compte.

→ FSF, OU LE FAUX SANS-FIL

Un enfant des années 1920 m'a raconté, longtemps après, que, quand ses parents avaient acquis un « poste de T.S.F. », il s'était étonné : ledit poste ne pouvait pas fonctionner sans fil. À l'époque, un enfant savait que T.S.F. signifie télégraphie sans fil. Les postes de T.S.F. étaient les ancêtres de nos postes de radio.

Rien n'a changé ! Même si notre connexion informatique est « Wi Fi » plutôt que « filaire », elle reste tributaire de fils, et ceux-ci se signalent, aujourd'hui comme hier, par leur inlassable propension à s'emmêler. Les mobiles et les portables ne nous débarrassent des fils que brièvement, puisqu'ils ne peuvent tenir longtemps sans passer par la case « recharge », qui consiste à ce qu'ils restent un bon moment au bout d'un fil.

La technique a remporté de nombreuses victoires contre les fils, mais les fils n'ont jamais perdu la guerre. Ils ont subi un revers dans le domaine des transmissions lorsque les satellites se sont mis à concurrencer ces fils géants que sont les câbles sous-marins. Mais ils ont contre-attaqué en se muant en fibres optiques. Ils ont été humiliés le jour où EDF a décidé de les enterrer et de les cacher plutôt que les tendre en haut de poteaux le long des routes. Mais la SNCF les met à l'honneur depuis qu'elle a remplacé le charbon par des caténaires. Etc. Si ce n'est déjà fait, une histoire de la technique et de son rapport aux fils mérite d'être écrite.



→ BIAIS HISTORIQUES

N'ayant aucune idée des questions qui préoccuperont le XXIII^e siècle, nous ne pouvons pas savoir quelles personnalités du XX^e seront encore connues. Imaginons alors qu'il retienne, parmi les physiciens, Joël Scherk (1946-1980) plutôt que Hans Bethe (1906-2005); le mathématicien Wolfgang Döblin (1915-1940) plutôt qu'Henri Cartan (1904-2008); l'ethnologue Pierre Clastres (1934-1977) plutôt que Claude Lévi-Strauss (1908-2009); le dramaturge Wolfgang Borchert (1921-1947) plutôt que Christopher Fry (1907-2005); l'écrivain Raymond Radiguet (1903-1923) plutôt qu'Ernst Jünger (1895-1998), etc. Dans ce cas, le XX^e siècle laissera le souvenir d'un siècle romantique, où les figures marquantes mouraient jeunes. Peut-être même, généralisant hâtivement, le XXIII^e siècle s'apitoiera-t-il sur la faible espérance de vie qui nous était promise à tous.

→ DEMANDEZ LE PROGRAMME !

Il ne faut pas que les programmes scolaires soient trop légers. Il ne faut pas non plus que, cédant aux exigences des disciplines qui veulent toutes la part du lion, ils soient trop lourds. Voici comment procéder pour atteindre le bon équilibre.

Faisons fixer les programmes d'une discipline M par des spécialistes d'une discipline M'. Mais attention ! Évitions que les spécialistes de M' soient, en retour, chargés des programmes de M. Chaque discipline s'ingénierait – par amitié, bien sûr, par jeu – à glisser des perfidies dans les programmes destinés à l'autre. De rétorsion en rétorsion, cela tournerait mal.

Pour désamorcer ce processus, il faut des chaînes longues. Exemple. Les économistes rédigent les programmes de philosophie ; les philosophes rédigent ceux de physique ; les physiciens, ceux de musique ; les musiciens, ceux de biologie ; les biologistes, ceux de littérature ; les littéraires, ceux de sport ; les sportifs, ceux

de mathématiques ; bouclant la boucle, les mathématiciens rédigent les programmes d'économie.

Ainsi, la tâche resterait confiée à des gens du métier, donc dûment exigeants, mais néanmoins raisonnables quant à la place qu'il convient d'accorder à la discipline dont ils élaborent les programmes.



→ QUESTION DE POINT DE VUE

Une erreur minime peut anéantir un travail scientifique. Un scientifique doit donc traquer sans indulgence les éventuelles insuffisances du raisonnement ou de l'expérience qui ont mené à un résultat. « Nous travaillons pour l'approbation à contrecœur de quelques amis », dit un mathématicien.

Au contraire, une œuvre littéraire ou philosophique peut être maladroite, inaboutie, contenir des erreurs, sans être anéantie pour autant. Critiquer les défaillances de l'œuvre ne doit pas mener à la rejeter. Le lecteur gagne à la tirer vers le haut, c'est-à-dire à lui donner une interprétation aussi riche que possible, de préférence à une interprétation stricte, mais pauvre. Les littéraires, les philosophes, doivent pratiquer entre eux la « charité herméneutique ». Même si on peut douter qu'ils la pratiquent effectivement toujours, il n'en demeure pas moins que cette expression est en usage chez eux et pas chez les scientifiques, et qu'il y a une

bonne raison à cela : en tant qu'attitude intellectuelle, la charité est une vertu littéraire, pas une vertu scientifique.

→ LES BRETelles D'ARTHUR

Les enfants se font gronder. Mais les adultes ? Ils n'ont pas passé l'âge d'agir autrement qu'ils ne devraient. Que leur arrive-t-il en ce cas ? Eh bien, le français n'a pas de terme neutre pour le dire – comme est neutre, par exemple, le verbe manger, à côté duquel en existent d'autres aux connotations variées (dévorer, déguster, savourer, etc.).

Non que les mots manquent, ni les expressions imagées, mais tous sont connus. Engueuler est vulgaire. Reprendre, rappeler à l'ordre, faire une observation, adresser une remontrance, sont des euphémismes dissimulant la vigueur réelle de la scène. Admonester, morigéner, tancer, sermonner, chapitrer, sont vieillots, sinon ridicules. La construction « Disputer quelqu'un » est fautive.

Quant aux expressions, elles pèchent par excès de familiarité. À part l'étrange « Se faire appeler Arthur », ce sont souvent de réjouissantes caricatures : « Passer un savon », « Souffler dans les bronches ». Ma préférée est « Remonter les bretelles » : à la force de la caricature, elle ajoute le charme du bon vieux temps, ressuscité par cet accessoire passé de mode que sont les bretelles. ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques
la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Les arpenteurs des confins
Explorateurs de l'intérieur de la Guyane (1720 - 1860)
Textes réunis et présentés par Francis Dupuy

288 pages
21 x 27 cm
ill. n. et b.
45 €

François Bordes et la préhistoire
Sous la direction de Françoise Delpéch et Jacques Jaubert

232 pages
21 x 27 cm
ill. couleur
45 €

On est tous dans le brouillard
Essai d'ethnologie urbaine
Colette Pétonnet
Réédition établie par Catherine Choron-Baix

544 pages
12 x 18,5 cm
ill. n. et b.
16 €

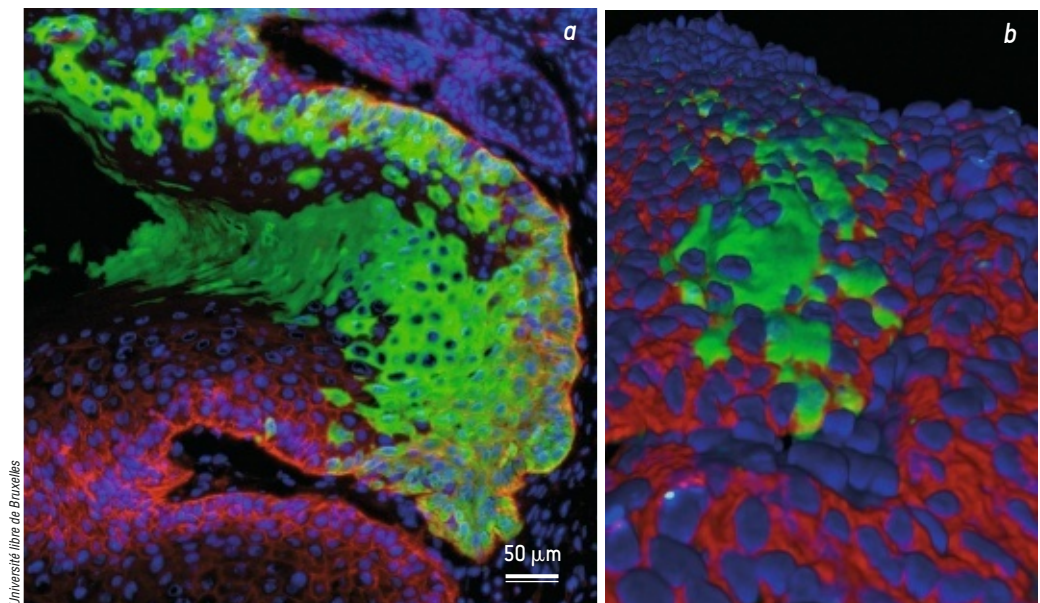
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

Médecine

Des cellules souches dans les tumeurs

Trois équipes montrent que les cellules d'une tumeur maligne ne contribuent pas toutes de la même façon à sa croissance. Une petite partie d'entre elles l'alimentent en se comportant comme des cellules souches.

La descendance d'une unique « cellule souche cancéreuse » (en vert) a été observée en microscopie à épifluorescence dans des tumeurs bénignes (a) et maligne (b) de la peau chez une souris. Pour réaliser cette étude, G. Driessens et ses collègues ont marqué aléatoirement les cellules cancéreuses au sein de la tumeur avec une protéine fluorescente, activée par l'administration à la souris d'un composé spécifique. Ce dernier est dosé de façon à ce que les cellules cancéreuses ainsi colorées soient peu nombreuses et dispersées dans la tumeur. Cela permet de détecter si la cellule marquée a proliféré, car sa descendance est aussi marquée, formant un îlot fluorescent appelé « clone ».



Pourquoi une partie des cancers traités récidivent-ils ? Les biologistes s'interrogeaient sur l'existence, dans les tumeurs, de « cellules souches cancéreuses », capables de se renouveler et de se différencier, et qui seraient responsables des rechutes. La preuve de leur existence était indirecte : transplantée chez une souris immunodéficente, une sous-population de cellules tumorales reforme une tumeur à l'identique. Trois équipes viennent de clore le débat en détectant, chez la souris, des cellules se comportant comme des cellules souches dans trois types de tumeurs.

Arnout Schepers, Hugo Snipert et leurs collègues de l'Institut Hubrecht, à Utrecht aux Pays-Bas, ont observé ces cellules dans un adénome intestinal, une tumeur précancéreuse ; Gregory Driessens, de l'Université libre de Bruxelles, et ses collègues ont montré leur existence dans une tumeur bénigne de la peau (un papillome) et ont étudié leur devenir dans une tumeur cutanée maligne (un carci-

nome). Enfin, avec ses collègues, Jian Chen, du Centre médical de l'Université du Sud-Ouest du Texas, à Dallas, a constaté qu'une petite population de cellules d'une tumeur maligne du cerveau (un glioblastome) se comporte comme des cellules souches et propage la tumeur après une chimiothérapie.

Les deux premières équipes ont montré que la plupart des cellules d'une tumeur prolifèrent peu, tandis que d'autres, plus durables, se comportent comme des cellules souches. En marquant aléatoirement les cellules tumorales, ces biologistes ont noté que si la plupart des cellules des tumeurs bénignes étudiées proliféraient peu et disparaissaient en quelques semaines, 20 pour cent étaient capables de persister plusieurs mois et se divisaient en de nombreuses cellules, qui occupaient alors une part importante de la tumeur. En outre, ces cellules se différenciaient pour engendrer l'ensemble des types de cellules tumorales.

Dans une tumeur maligne de la peau, en revanche, la propor-

tion de ces « cellules souches » était beaucoup plus importante, comme si la capacité des cellules tumorales à se différencier en cellules moins prolifératives était altérée. Les travaux de la troisième équipe vont aussi dans ce sens. En marquant les cellules souches neurales d'une souris atteinte d'un glioblastome, J. Chen et ses collègues ont montré qu'une sous-population repeuple la tumeur après un traitement anticancéreux.

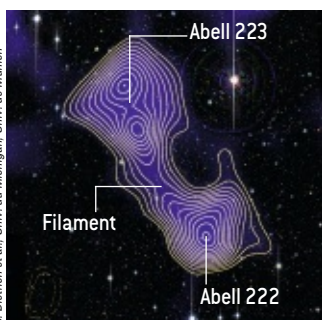
En revanche, l'utilisation conjointe d'un anticancéreux et d'une molécule bloquant la prolifération des cellules souches neurales entrave la croissance tumorale. Ces résultats suggèrent donc qu'il existe bien des cellules souches cancéreuses et qu'elles participeraient au processus de récurrence. Tient-on une piste pour éradiquer les tumeurs ? Peut-être, mais, tempère Benjamin Beck, coauteur de la deuxième étude, la route sera encore longue.

→ Marie-Neige Cordonnier

Scienceexpress, 1^{er} août 2012 ; Nature, doi 10.1038/nature11344 et 10.1038/nature11287, 2012

Cosmologie

Un filament de matière noire repéré



L'étude par effet de lentille gravitationnelle de la distribution de masse entre l'amas Abell 222 (en bas) et l'amas Abell 223 (en haut) suggère qu'il existe un filament composé à plus de 80 pour cent de matière noire.

La matière noire serait un composant essentiel de l'Univers: sa nature est inconnue, mais elle serait cinq fois plus abondante que la matière ordinaire. Elle aurait joué un rôle crucial dans la formation des grandes structures de l'Univers actuel. Les simulations numériques suggèrent que la matière noire formerait aujourd'hui de longs filaments. L'équipe de Jörg Dietrich, de l'Université du Michigan, en aurait découvert un, en détectant son effet sur le trajet de la lumière issue de sources d'arrière-plan – technique dite de lentille gravitationnelle. Les astronomes ont étudié un candidat filament reliant les superamas de galaxies Abell 222 et Abell 223. Ce filament est particulièrement intéressant parce qu'il est orienté quasiment selon la ligne de visée des observations. L'effet de lentille gravitationnelle se cumule ainsi sur toute la longueur du filament.

Comme d'autres observations, toutes indirectes, ce résultat renforce l'hypothèse de l'existence de la matière noire, en attendant une détection directe ou sa production dans un collisionneur de particules.

→ Sean Bailly

J. Dietrich et al., *Nature*, vol. 487, pp. 202-204, 2012

Neurosciences

Le geai, la cruche et l'enfant

Dans la fable d'Esoppe *La corneille et la cruche*, une corneille assoiffée découvre une cruche contenant de l'eau, mais pas assez pour qu'elle puisse l'atteindre. Elle y jette alors des cailloux jusqu'à ce que le niveau soit assez élevé pour qu'elle puisse boire. En 2011, Lucy Cheke et ses collègues de l'Université de Cambridge, en Angleterre, avaient montré que cette fable reflète la réalité: après quelques essais, des corvidés (en l'occurrence, des geais des chênes) mis dans une situation comparable (ils doivent élever le niveau d'eau dans un tube pour atteindre un appât qui y flotte) utilisent la même stratégie. Comment réagiraient des enfants face à une telle situation? Les psychologues l'ont déterminé dans une nouvelle étude, où ils ont soumis des enfants de quatre à dix ans aux mêmes tests que les corvidés.

Entre cinq et sept ans, les enfants ont, comme les oiseaux, besoin de quelques essais (pas plus de cinq) avant de comprendre ce qu'il faut faire. Dès huit ans, ils trou-

Le geai des chênes est presque aussi intelligent qu'un enfant de sept ans. Du moins d'après le test de la cruche...



vent tout de suite la solution. Doit-on en conclure que les capacités de raisonnement des enfants de cinq à sept ans sont comparables à celles des corvidés? Pas si simple. Quand le dispositif est en partie masqué de façon que l'action à effectuer soit sans logique apparente, les enfants de plus de huit ans trouvent la solution au bout de quelques essais, mais pas les geais.

En d'autres termes, même si les enfants ne comprennent pas comment leur action entraîne le

résultat attendu et la récompense, ils agissent. Cela ne semble pas être le cas des geais. Cette souplesse de pensée aiderait l'enfant à appréhender le monde. Mais le geai en est-il vraiment incapable? L'enfant grandit dans un environnement où il est encouragé à agir de façon contre-intuitive (appuyer sur un bouton pour produire une lumière ou un son, etc.). Que ferait un geai élevé dans les mêmes conditions?

→ M.-N. C.

L. Cheke et al., *PLoS ONE*, vol. 7(7), e40574, 2012

En bref

TERMITES KAMIKAZES

Certains termites de l'espèce *Neocapritermes taracua* sont dotés d'une bombe chimique interne à deux composants: des cristaux bleus et des sécrétions salivaires. Une équipe internationale a montré que lorsqu'ils sont immobilisés par des adversaires, ces termites entraînent ces derniers dans la mort en créant un mélange toxique de ces deux substances. En outre, plus ils sont âgés, plus leurs cristaux sont développés, et plus ils sont donc aptes au sacrifice.

LES VARANS VIENNENT D'ASIE

Les varans sont présents de l'Afrique à l'Australie, en passant par l'Asie. Cette famille de lézards comprend 73 espèces avec une grande diversité en taille, écologie et alimentation. Le séquençage de gènes nucléaires et mitochondriaux de 38 espèces de varans par une équipe internationale a permis de montrer que ces derniers ont une origine asiatique. Ils auraient colonisé l'Afrique il y a environ 40 millions d'années, et l'Australie 10 millions d'années plus tard.

UN MAYA DE 1300 ANS

Des archéologues de l'Université de Bonn ont découvert une tombe vieille de 1300 ans à Uxul, au Mexique. Âgé de 20 à 25 ans, un personnage maya y a été couché sur le dos, les mains sur le ventre. Il a été accompagné d'offrandes alimentaires, dont attestent quatre assiettes et cinq gobelets. Peinte d'élégants hiéroglyphes, une assiette était posée sur le crâne du défunt. Sur un gobelet, une inscription signale: « Ceci est le verre à boire du prince. » Boire quoi? Du chocolat, bien sûr.

Physiologie

Des protéines à la sensation de satiété

Les protéines alimentaires coupent la faim pendant plusieurs heures après le repas. On parle de satiété – à ne pas confondre avec le rassasiement, qui est immédiat et provoqué par la tension de l'estomac et la sécrétion de diverses hormones. Gilles Mithieux, de l'INSERM, et ses collègues ont précisé les interactions compliquées du système digestif et du cerveau à l'origine de la satiété.

Lors de la digestion, les protéines sont fractionnées en peptides dans l'intestin. Ces peptides passent dans le sang et atteignent la veine porte, dont l'intérieur est tapissé de nerfs. Ils se fixent sur des

récepteurs dits mu-opioïdes localisés sur certains de ces nerfs. Ces récepteurs, abondants dans le cerveau, étaient connus pour leur rôle dans les effets antidouleurs de la morphine, mais on ignorait leur présence dans la veine porte et leur sensibilité aux peptides.

Environ cinq heures après le repas, la fixation des peptides sur les récepteurs mu-opioïdes entraîne l'envoi d'un signal. Le cerveau y réagit en déclenchant dans l'intestin une synthèse de glucose à partir de substrats également issus de la digestion des protéines. À l'instar des peptides, le glucose passe dans le sang et atteint la veine porte, où il est

détecté par des récepteurs présents sur des nerfs tapissant la paroi interne de la veine. Ces nerfs sont connectés à des aires cérébrales commandant la sensation de faim, tel l'hypothalamus, aires qui engendrent alors la satiété.

La compréhension de ce mécanisme pourrait aider à lutter contre l'obésité : l'identification du rôle clef des récepteurs mu-opioïdes permettra peut-être de trouver des molécules particulièrement efficaces, et moins caloriques que les protéines, pour déclencher le signal aboutissant à l'effet coupe-faim.

→ Guillaume Jacquemont

G. Mithieux et al., *Cell*, en ligne le 5 juillet 2012



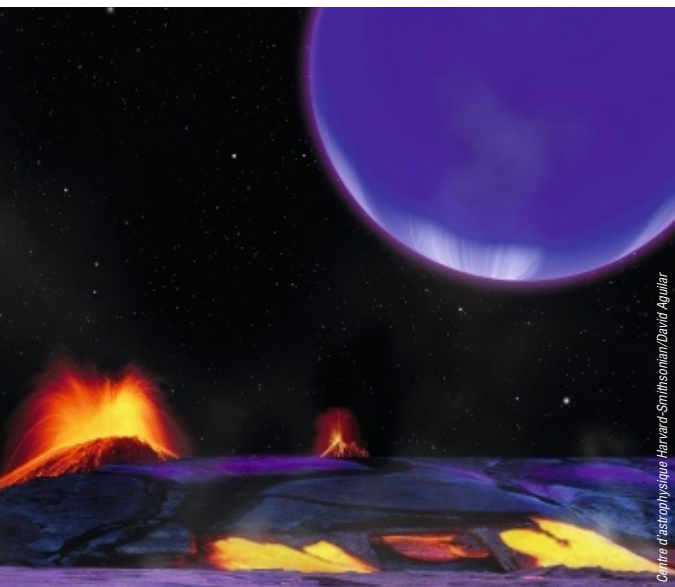
© César Pizarro/Shutterstock

La viande, le poisson ou les œufs entraînent une sensation de satiété plusieurs heures après le repas grâce aux protéines qu'ils contiennent.

28 MÈTRES : c'est le diamètre du miroir de HESS-II, le plus grand télescope jamais construit dans le domaine gamma. En service depuis le 26 juillet, il est en Namibie.

Astrophysique

Des exoplanètes si proches et si différentes



Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian/David Aguilar

Image d'artiste de la géante gazeuse Kepler-36c vue depuis l'exoplanète Kepler-36b, une super-Terre. Les orbites des deux planètes sont si voisines que, au plus près, la planète gazeuse géante y apparaît 2,5 fois plus grande que la Lune pour nous.

Dans le Système solaire, les conditions de formation des planètes expliquent que les planètes rocheuses sont les plus proches de l'étoile, et que les géantes gazeuses viennent après. L'étude des exoplanètes montre que cet ordre peut être modifié par la migration de planètes vers leur étoile. Ce serait un phénomène courant. Une nouvelle observation réalisée avec le télescope spatial *Kepler* illustre un peu plus la richesse des configurations possibles.

Autour de l'étoile Kepler-36, l'équipe de Joshua Carter, du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, et Eric Agol, de l'Université de Washington, a mis en évidence deux exoplanètes ayant des orbites très proches l'une de l'autre (moins de dix pour cent d'écart). L'une (Kepler-36b) serait une super-Terre rocheuse et l'autre (Kepler-36c) une planète gazeuse comparable à Neptune. Leurs densités sont en effet très différentes : 6,8 et

0,86 grammes par centimètre cube respectivement.

Les deux planètes, identifiées par transit (baisse de luminosité lors du passage de la planète devant l'étoile), ont des périodes de révolution d'environ 14 et 16 jours. Au plus près, elles sont à environ deux millions de kilomètres l'une de l'autre, ce qui est très peu. Une aussi grande proximité perturbe-t-elle la trajectoire de ces planètes ? D'après les simulations numériques, ce système a 91 pour cent de chance d'être stable pendant au moins 700 000 ans.

Ces planètes si différentes se sont probablement formées dans des régions distinctes de leur système stellaire, avant de se rapprocher ultérieurement. Des effets de marées exercés au sein du disque protoplanétaire pourraient être à l'origine de cette migration.

→ Sean Bailey

J. A. Carter et al., *Science*, vol. 337, pp. 556-559, 2012

DE SOMBRES MONARQUES

Les monarques sont des papillons migrateurs d'Amérique du Nord. Une étude récente a mis en évidence une corrélation entre leur endurance et la couleur des ailes : les papillons qui parcourent les distances les plus importantes sont ceux dont la couleur orange des ailes est la plus foncée. Il est probable que des réactions biochimiques lors du développement influent simultanément sur la couleur des ailes et, par exemple, sur les muscles du thorax ou le métabolisme.

LES NEURONES DE L'IRONIE

« C'était passionnant ! » est une déclaration ironique après un spectacle ennuyeux. Comment voit-on « derrière » les mots et les gestes ? On connaissait un réseau neuronal activé par de telles situations non verbales (par exemple celle où un homme feint de plier sous le poids d'un objet léger). Cependant, son implication dans le traitement des énoncés restait à prouver. C'est chose faite : une équipe du CNRS a montré que ce réseau est particulièrement activé par les phrases ironiques.



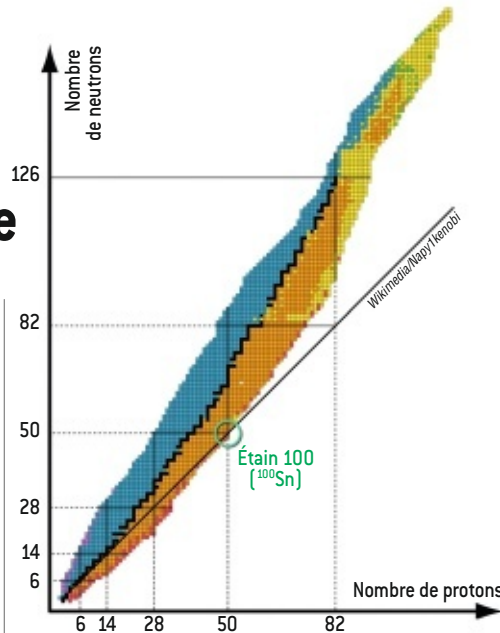
Un échantillon rocheux d'une cinquantaine de micromètres est comprimé entre deux pointes de diamant (dans le cylindre de cuivre rougeâtre au centre) et chauffé avec un laser.

Physique

Un noyau doublement magique, mais instable

Une équipe internationale menée par Christoph Hinke, de l'Université de Munich, a réussi à mesurer la durée de vie et l'énergie de désintégration d'un noyau atomique intéressant, l'étain 100. D'une part, ce noyau est au bord de la stabilité nucléaire, où l'interaction forte liant les nucléons (protons et neutrons) ne suffit plus à surmonter la répulsion électrique entre les protons. D'autre part, les nombres de ses protons (50) et de ses neutrons (50 aussi) ont des valeurs qui devraient le rendre particulièrement stable, selon le « modèle en couches » des noyaux.

Dans ce modèle simplifié mais efficace, les nucléons remplissent des niveaux d'énergie en commençant par ceux les plus bas. De façon analogue aux atomes avec leurs électrons, un noyau est très stable lorsque ses plus hautes couches occupées sont remplies, ce qui correspond à des nombres de nucléons qualifiés de magiques. Et un noyau qui contient un nombre magique de protons et un nombre magique de neutrons est doublement magique, donc d'autant plus stable. C'est le cas de l'étain 100 avec ses 50 protons et 50 neutrons. Ce noyau est donc très stable vis-à-vis de l'interaction forte. Toutefois, la répulsion électrique entre les protons augmente la probabilité que l'un des protons se transforme en neutron par une désintégration bêta, d'où une durée de vie courte de l'étain 100. Pour produire des noyaux d'étain 100, les



Sur ce diagramme, les noyaux atomiques sont répartis en fonction de leurs nombres de protons et neutrons (la couleur indique leur stabilité ou leur mode de désintégration). Le noyau d'étain 100 est à la limite de la région où la formation de noyaux est permise.

physiciens ont bombardé au GSI, à Darmstadt en Allemagne, une cible de béryllium avec un faisceau de xénon 124. Ils ont notamment mesuré avec une précision inédite sa demi-vie (temps au bout duquel la moitié des noyaux se sont transformés en indium 100), qui est de 1,16 seconde, en bon accord avec les calculs fondés sur le modèle en couches.

→ S. B.

C. Hinke et al., *Nature*, vol. 486, pp. 341-345, 2012

Géophysique

Aux sources des points chauds volcaniques

L'origine des volcans dits de point chaud, tels ceux de Hawaï et de La Réunion, fait débat. Ces volcans seraient créés par des panaches chauds de magma, au-dessus desquels défilent les plaques tectoniques, mais d'où viennent ces panaches ? La théorie dominante situe leur origine à la frontière entre le noyau et le manteau terrestres, à 2900 kilomètres de profondeur. D'après des expériences de Denis Andrault, de l'Université Blaise Pascal, à Clermont-Ferrand, et ses collègues, le magma formé dans cette région remonte vers la surface, ce qui est un argument en faveur des panaches profonds.

Les géophysiciens ont synthétisé des roches dites chondritiques, de même composition chimique que celles du manteau profond. Ils ont ensuite soumis de petits échantillons aux conditions thermodynamiques régnant à la frontière entre le noyau liquide et le manteau solide (plus d'un million de fois la pression de l'atmosphère et entre 3 000 et 4 000 °C). Résultat : les roches ont partiellement fondu.

Quelle est la densité des poches liquides par rapport au solide environnant ? Deux facteurs influent sur la variation de densité lorsque la roche fond : la modification des arrangements atomiques et la por-

tion dans laquelle les divers éléments, tel le fer, se dissolvent dans le liquide – autrement dit, la composition chimique de la phase liquide. Ces paramètres dépendent des conditions dans lesquelles s'effectue la fusion. D. Andrault et ses collègues les ont déterminés pour la première fois en reproduisant cette fusion de façon réaliste, puis en analysant les échantillons aux rayons X. Ils ont conclu que la phase liquide est moins dense que la phase solide, et remonte donc vers la surface par la poussée d'Archimède. Comme l'exigeraient les panaches profonds...

→ G. J.

Nature, en ligne le 19 juillet 2012

En bref

DES RÉSERVES INEFFICACES

Une vaste étude internationale a examiné les changements ayant eu lieu au cours des 20 ou 30 dernières années au sein d'un échantillon de 60 aires protégées dans le monde, en se concentrant sur 31 groupes d'espèces animales et végétales. Le bilan n'est pas brillant : seule la moitié des aires considérées assurent une protection efficace ou passable, tandis que les autres subissent une érosion de leur biodiversité souvent alarmante. En cause : essentiellement la fragmentation des milieux, la chasse et l'exploitation forestière.

UN PÉTAWATT DE LASER

Le système laser BELLA (*Berkeley Lab Laser Accelerator*), aux États-Unis, bientôt fin prêt, a d'ores et déjà battu un record mondial. Il a fourni des impulsions de 40 femtosecondes au rythme d'une par seconde, avec une puissance maximale de un pétawatt (10^{15} watts). Le système BELLA est destiné à piloter un accélérateur à plasma, qui permettra de produire au bout de un mètre un faisceau d'électrons de 10 gigaélectronvolts, alors qu'un accélérateur classique nécessiterait des kilomètres.



Lorsqu'on demande à une personne de dessiner un rectangle et un triangle, elle représente en général des formes proches de celles ci-dessus : elle a en mémoire des prototypes de ces formes géométriques.

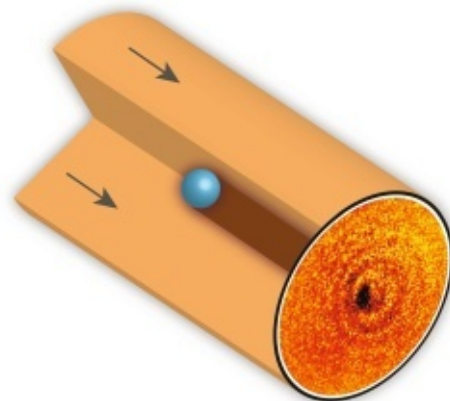
Physique

La première image de l'ombre d'un atome

L'imagerie par absorption permet, entre autres, de mesurer la densité des gaz et a de multiples applications. Les propriétés du milieu sont déduites de l'analyse de la lumière absorbée pendant la traversée. Mais combien d'atomes au minimum sont nécessaires pour utiliser cette technique ? Une équipe de physiciens australiens de l'Université Griffith, dirigée par David Kielpinski, a montré qu'un seul atome suffit.

L'imagerie par absorption repose sur un principe simple : l'objet étudié est placé entre une source de lumière et un capteur. Ce dernier enregistre l'ensemble des photons qui ne sont pas absorbés ou diffusés par l'objet. Le paramètre clef est le contraste entre le point le plus sombre de l'image et le plus brillant. Si le nombre d'atomes de l'objet est faible, peu de photons sont absorbés, et le contraste est faible. Cela est d'autant plus important que la probabilité d'absorption d'un photon par un atome est en général très faible. Un grand nombre d'atomes permet de compenser cette contrainte : un objet dense donne un bon contraste.

De nombreuses équipes ont étudié les limites de cette technique avec un nombre réduit d'atomes, voire un seul. Dès 1987, une telle mesure était effectuée avec une photodiode, qui mesurait la quantité de lumière totale en présence ou en l'absence de la particule. D. Kielpinski et son équipe ont remplacé



E. Streed et al.

L'atome est éclairé par le laser (venant d'en haut à gauche) et projette son ombre sur le capteur CCD (en bas à droite).

la photodiode par un capteur CCD dont chaque pixel agit comme une photodiode et qui permet de réaliser une véritable image de l'« ombre » d'un atome. Le contraste est de l'ordre de trois pour cent. La taille de la tache et la valeur du contraste sont en parfait accord avec un modèle dit semi-classique de la diffusion de la lumière par un atome isolé.

→ S. B.

E. W. Streed et al., *Nature Communications*, vol. 3, 3 juillet 2012

Neurosciences

Des prototypes géométriques dans la tête

Demandez à des adultes ou à des enfants âgés de cinq à six ans de dessiner un rectangle et un triangle : ils réalisent des figures presque toutes semblables. Les rectangles sont allongés à l'horizontale, de longueur 2,2 fois supérieure à la largeur en moyenne. La plupart des triangles sont isocèles, à angle aigu, avec des côtés 1,2 fois plus longs que leur base horizontale. Tels sont les résultats d'expériences réalisées par Solène Kalenine, du Laboratoire de psychologie et neurocognition de Grenoble, et ses collègues, portant sur 78 adultes et 68 enfants.

Les participants à ces tests reconnaissent aussi mieux ces

« prototypes » que d'autres rectangles ou triangles ayant des caractéristiques (longueur et largeur des côtés par exemple) différentes. Cela suggère que l'on mémorise de préférence ces prototypes. Est-ce parce qu'on les voit plus souvent dans l'environnement dès la naissance ? Pour le prouver, Anne Theurel et ses collègues, dans le même laboratoire, ont demandé à 28 adolescents de reconnaître trois types de formes géométriques – des carrés, des rectangles et des triangles – en utilisant le sens du toucher et non la vision. La moitié des adolescents avaient les yeux bandés, les 14 autres étaient aveugles de nais-

sance et n'avaient donc jamais vu de formes géométriques.

Les tests montrent que les aveugles reconnaissent mieux les formes que les adolescents voyants, qu'elles soient ou non prototypes. Par ailleurs, les voyants distinguent mieux au toucher les carrés, triangles et rectangles prototypes que les formes non prototypes. Le fait que l'on reconnaisse davantage ces prototypes serait donc lié à notre expérience visuelle et à leur mise en mémoire *via* une exposition visuelle répétée dans notre environnement.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

British Journal of Psychology, à paraître, 2012 ; *PLoS One*, en ligne le 28 juin 2012

Éthologie

Deux mouches d'un coup

L'accouplement le soir n'est pas sans risque pour les mouches : trahi par le bruit du mouvement de leurs ailes, le couple est une cible facile pour les chauves-souris. L'hypothèse que la copulation est une phase à risque pour les animaux a été suggérée dans les années 1920, car elle s'accompagne d'une baisse de la vigilance et d'une réaction de fuite moins efficace. Mais peu d'études ont été réalisées sur le sujet. Stefan Greif, de l'Institut Max Planck d'ornithologie, et ses collègues ont étudié le cas de la mouche. La nuit, les chauves-souris ne voient pas les mouches. Dans une étable, par exemple, elles ne volent pas, font peu de bruit et sont relativement bien camouflées. Mais lors de l'accouplement, les mouches battent des ailes et révèlent ainsi leur présence au prédateur, qui fond sur la double proie. L'équipe de S. Greif a montré qu'une reproduction précise du bruit des mouches par un haut-parleur déclenche le même comportement d'attaque de la chauve-souris...

→ S. B.

B. M. Siemers et al., *Current Biology*, vol. 22(14), pp. R563-564, 2012

© Jerome Whittingham/shutterstock.com

Cosmologie

Galaxies révélées par quasars

D'après les théories de formation et d'évolution des galaxies, des nuages de gaz se sont formés dans l'Univers jeune. Ces protogalaxies sont relativement sombres, car la formation d'étoiles y est très faible. Comme ces structures n'émettent pas de lumière, elles sont très difficiles à observer. Néanmoins, Sebastiano Cantalupo, de l'Institut Kvali de cosmologie de Cambridge, et ses collègues ont réussi à observer de telles galaxies, grâce à l'éclairage d'un quasar. Ce dernier contient un trou noir supermassif qui accélère la matière environnante. Celle-ci s'échauffe par frottements et émet une grande quantité de lumière, qui se propage et est absorbée par les nuages de gaz, lesquels émettent alors un rayonnement par fluorescence. Les astronomes ont utilisé le télescope VLT, de l'Observatoire austral européen au Chili, pour étudier la région proche du très brillant quasar HE 0109-3518, distant de nous de 19 milliards d'années-lumière. Ils ont ainsi détecté 12 objets à quelques millions d'années-lumière du quasar, dont la luminosité est dominée par la fluorescence.

→ S. B.

S. Cantalupo et al., *MNRAS*, à paraître, 2012

Océanographie

Doigts de sel et océan stratifié

Dans certaines régions des océans, la colonne d'eau est structurée en couches épaisses de 10 à 30 mètres, où la température et la salinité sont assez uniformes, ces grandeurs diminuant d'une couche à la suivante. Pourquoi un tel profil en escalier de la température et de la salinité, ou « escalier thermohalin », au lieu d'une variation régulière ? Des simulations numériques confortent et précisent l'une des hypothèses émises par les océanographes, celle incriminant les « doigts de sel ».

Selon cette hypothèse, l'origine de la stratification thermohaline est à chercher dans d'étroits volumes d'eau plus chaude et plus salée que l'eau environnante et qui s'enfoncent dans cette dernière, les doigts de sel. Or en Italie, Francesco Paparella, de l'Université du Salento à Lecce, et Jost von Hardenberg, de l'Institut des sciences atmosphériques et du climat à Turin, ont constaté dans leurs simulations que les doigts de sel se regroupent en formant de plus grandes structures. Cela permettrait de brasser des volumes d'eau assez importants pour que la température et la salinité deviennent homogènes au sein d'une couche, et expliquerait ainsi la stratification.

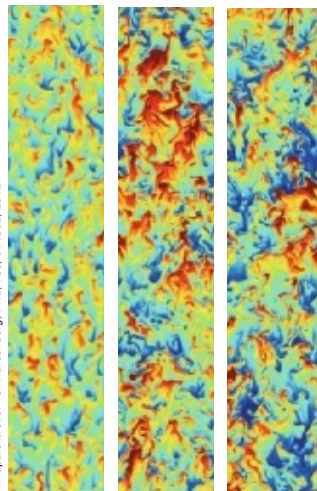
Qu'est-ce qu'un doigt de sel et comment se forme-t-il ? Partons d'une couche où la température et

la salinité décroissent régulièrement avec la profondeur. Supposons qu'un petit volume d'eau chaude et salée de la partie supérieure s'enfonce un peu vers le bas. Ce petit volume d'eau va se refroidir et acquérir la même température que son nouveau voisinage, mais, dans un premier temps, garder la même salinité : en effet, et c'est là le point important, la salinité diffuse 100 fois moins vite que la chaleur. Étant plus salé que son voisinage, ce volume d'eau est plus dense, donc continue à s'enfoncer. De ce fait, sa température diminue, et ainsi de suite. Et en s'enfonçant, le volume d'eau entraîne derrière lui du liquide qui subit le même sort. Globalement, il se constitue un mouvement descendant d'eau vertical : un doigt de sel. Le même phénomène se produit dans le sens inverse, avec une remontée d'eau plus froide et moins salée que l'eau environnante.

L'agrégation des doigts de sel augmente le brassage des eaux, et l'on comprend alors pourquoi la température et la salinité deviennent à peu près uniformes.

En revanche, là où la variation verticale de température et salinité est brutale, ces structures plus grosses sont ralenties et perdent de leur cohérence (les échanges avec le fluide environnant ne se font plus assez vite). L'efficacité du brassage diminue alors à ces endroits. La conjonction du brassage par les masses de doigts de sel et la diminution de son efficacité aux endroits où le gradient de température/salinité est élevé serait ainsi responsable de la formation des escaliers thermohalins.

→ Maurice Mashaal

Physical Review Letters, vol. 109, 014502, 2012F. Paparella et J. von Hardenberg, *PHL*, 109, 014502, 2012

Simulation de doigts de sel dans une section verticale d'une colonne d'eau à trois instants successifs. La couleur code la salinité (maximale en rouge). On constate un regroupement des doigts de sel en structures cohérentes plus grandes.

Neurobiologie

Des singes photocontrôlés

Peut-on déclencher une action en stimulant directement le circuit neuronal qui en est responsable? Oui, c'est ce que réalise l'optogénétique. Le principe est d'insérer dans les neurones des gènes codant des protéines photosensibles, susceptibles de déclencher l'émission d'un signal, puis de soumettre ces neurones à des impulsions lumineuses (par exemple à l'aide de fibres optiques implantées dans le cerveau). De la sorte, on a notamment fait décoller des mouches ou mis en évidence – sur des modèles animaux – des circuits neuro-naux potentiellement utiles pour traiter certaines maladies mentales.

Annelies Gerits, de l'Hôpital général du Massachusetts, et ses collègues ont appliqué cette technique à des singes rhésus. Ils ont ainsi légèrement influé sur le mouvement de leurs yeux. C'est la première fois qu'on réalise une telle opération sur des primates. Seuls quelques travaux d'optogénétique leur avaient été consacrés, mais ils n'avaient pas obtenu d'influence visible sur le comportement.

→ G. J.

A. Gerits et al., *Current Biology*, en ligne le 27 juillet 2012

Sciences de la Terre

Des parasites militaires

Le satellite SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) de l'Agence spatiale européenne (ESA) est dédié à l'étude du cycle de l'eau; il se focalise sur la teneur en eau des sols et la salinité des océans. Depuis son lancement en 2009, les observations ont été rendues difficiles dans l'hémisphère Nord (au-dessus de 45 degrés de latitude) par d'importantes interférences entre 1 400 et 1 470 mégahertz, une gamme de fréquences normalement réservée aux études scientifiques et utilisée par SMOS.

L'ESA, aidée de plusieurs pays, a pu identifier la source de ces nuisances: il s'agit principalement de radars militaires installés au Canada et au Groenland. À partir de 2011, sur la demande des autorités gérant l'attribution des gammes de fréquences, le Canada a entrepris de rénover ses radars et le Groenland a fermé ses installations.

Depuis ces interventions, sur au moins 13 sites, les données du satellite SMOS se sont grandement améliorées. Cela devrait aussi bénéficier au satellite *Aquarius* de la NASA, dont l'objectif est également d'étudier la salinité des océans.

→ S. B.

Glaciologie

Une vallée sous la glace en Antarctique

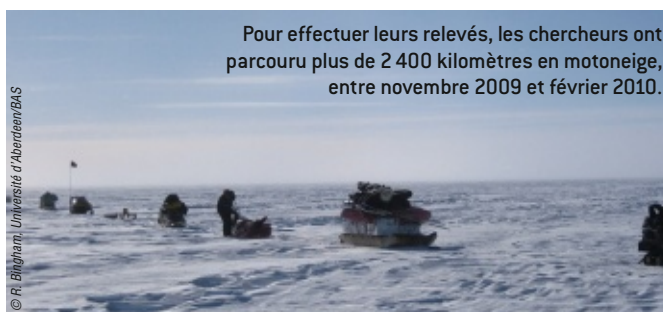
La fonte des calottes glaciaires résulte d'interactions complexes entre les courants océaniques ou atmosphériques et le socle rocheux: celui-ci dégage de la chaleur et son relief influe sur les écoulements de glace et les transferts d'énergie. Or ce relief est parfois mal connu. Robert Bingham, de l'Université d'Aberdeen, au Royaume-Uni, et ses collègues ont effectué des relevés topographiques dans une région de l'Ouest de l'Antarctique nommée Ferrigno, et ont découvert qu'une profonde vallée dort sous la glace.

Les chercheurs ont choisi Ferrigno parce que la perte de glace, mesurée par satellite (*via* l'altitude de surface de la calotte), y est importante. Ils ont sondé le relief à l'aide d'un radar à basses fréquences, transporté sur une motoneige, et complété leurs données avec des relevés par avion. Ils ont ainsi découvert une vallée dont la pro-

fondeur atteint 1 500 mètres. Il s'agirait d'un rift – une faille pouvant résulter de divers mécanismes, tel un étirement de la plaque tectonique –, qui s'inscrirait dans un réseau courant sous tout l'Ouest de l'Antarctique. En effet, la croûte terrestre est plus mince à cet endroit, comme l'ont notamment révélé des mesures gravimétriques (des mesures satellitaires des anomalies de gravité de la Terre).

La connaissance de ce relief aidera à prévoir l'évolution de la calotte glaciaire. Cette dernière s'amincit principalement le long des côtes, en raison du réchauffement des courants océaniques et atmosphériques. La prise en compte du relief sous la glace est capitale pour déterminer la façon dont cet amincissement se propage vers le centre du continent, et donc pour prévoir l'évolution future des calottes...

→ G. J.

R. Bingham, *Nature*, en ligne le 26 juillet 2012

Pour effectuer leurs relevés, les chercheurs ont parcouru plus de 2 400 kilomètres en motoneige, entre novembre 2009 et février 2010.

© R. Bingham, Université d'Aberdeen/GAS

DERNIÈRE minute...

CURIOSITY: ATERRISSAGE RÉUSSI

Le 6 août 2012, le rover *Curiosity* s'est posé avec succès sur la planète Mars, dans le cratère Gale. Son poids élevé – près d'une tonne – a nécessité le développement d'une procédure d'atterrissage inédite, incluant la dépose du véhicule au sol par une sorte de porteur-grue doté de moteurs-fusées. Équipé de 12 instruments scientifiques, *Curiosity* entame une mission

de deux ans à la recherche d'une vie passée ou présente sur Mars...

DES ANTICORPS CONTRE LES GRIPPES

Les virus de la grippe sont variés, mais la plupart comportent des hémagglutinines, des protéines de surface essentielles à la pénétration du virus dans la cellule cible. Cyrille Dreyfus, de l'Institut de recherche Scripps, aux États-

Unis, et ses collègues ont découvert trois anticorps humains qui se lient à plusieurs variantes de ces protéines et neutralisent différents types du virus. Un pas de plus vers un vaccin universel contre la grippe ?



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

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ET EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

■ **Grenoble Sciences** est un label de qualité attribué par le centre de conseil et expertise. Il assure une reconnaissance du monde scientifique.

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

MATHÉMATIQUES

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTÉ

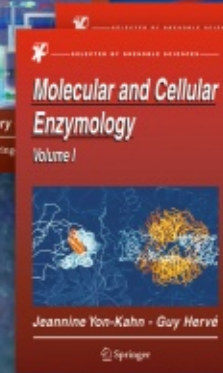
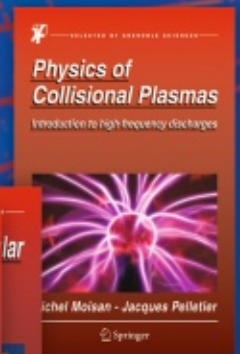
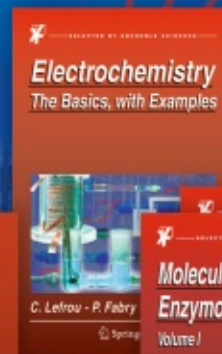
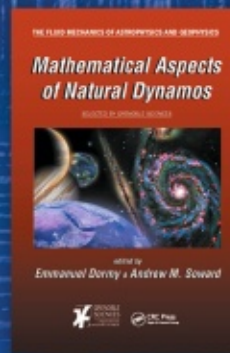
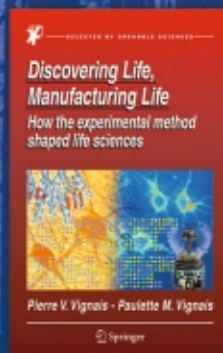
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

ANGLAIS DE SPÉCIALITÉ

SCIENCES DE LA MATIÈRE

ÉVOLUTION DES IDÉES SCIENTIFIQUES

■ Les ouvrages labellisés sont parmi les plus traduits en anglais des ouvrages scientifiques. *Selected by Grenoble Sciences* et ses couvertures rouges se trouve chez Springer, Taylor and Francis, Kluwer, etc.



■ Les auteurs dont les projets sont retenus bénéficient du soutien du centre technique *Grenoble Sciences* pour la réalisation de leurs ouvrages (papier, numérique ou « papebook »).



Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ UN REFROIDISSEMENT CLIMATIQUE INATTENDU

En 2002, Jean-Claude Duplessy, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA), expliquait les moteurs de l'évolution climatique (voir « L'évolution des climats », *Pour la Science*, octobre 2002, http://bit.ly/PLS300_Duplessy). Il mentionnait notamment les poussées glaciaires dues aux variations de l'orbite terrestre, lesquelles modifient l'énergie solaire reçue au sol.

Or, autour de Jan Esper, de l'Université de Mayence en Allemagne, une équipe internationale vient de déceler un refroidissement d'origine astronomique inattendu (*Nature Climate Change*, juillet 2012). Les chercheurs ont étudié les cernes de croissance de nombreux pins conservés depuis l'Antiquité dans les lacs du Nord de la Finlande. Ils sont ainsi parvenus à reconstituer un profil de la température

moyenne allant jusqu'en 138 avant notre ère et d'une qualité sans précédent.

Ce profil livre en particulier des reconstructions de très haute résolution des périodes chaudes de l'époque romaine et du Moyen Âge, mais aussi des phases froides de l'époque des Grandes Migrations ou du petit âge glaciaire. Le résultat le plus surprenant est qu'il indique aussi une tendance au refroidissement de 0,3 °C par millénaire. Selon les chercheurs, cette dernière est due à une augmentation graduelle de la distance Terre-Soleil. Cette tendance n'est pas négligeable par rapport au réchauffement climatique actuel qui, pour le moment, est de moins de 1 °C. Selon J. Esper, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a probablement sous-estimé dans ses prédictions ce refroidissement d'origine astronomique. Lequel, toutefois, ne change pas notablement la tendance globale, qui est bien à la hausse.

→ LA NAISSANCE ÉTOILÉE D'UNE NAIN BRUNE

Le cœur d'une planète n'est pas le siège d'une fusion thermonucléaire de l'hydrogène, contrairement à ce qui se passe dans une étoile. Dans une naine brune, astre de masse comprise entre 12 et 80 fois celle de Jupiter, seul le deutérium, un isotope naturel de l'hydrogène, est en fusion. Comment se forment de tels astres ? En 2008, l'article de Subhanjoy Mohanty et Ray Jayawardhana expliquait que certains astronomes privilégiaient un mécanisme de formation des naines brunes proche de celui des étoiles (voir « La naissance tragique des naines brunes », *Pour la Science*, février 2008, http://bit.ly/PLS340_Mohanty).

Or des astrophysiciens viennent de repérer une naine brune en train de naître (*Science*, 6 juillet 2012). L'équipe internationale dirigée par Philippe André, du Laboratoire AIM (CEA-CNRS, Paris Diderot), a utilisé le grand interféromètre de l'IRAM opérant dans le domaine des ondes millimétriques. Dans une pépinière d'étoiles distante de quelque 450 années-lumière et nommée Rho Ophiuchi, elle a découvert Oph B-11, un fragment compact de nuage de gaz et de poussières, de masse comprise entre 10 et 30 fois celle de Jupiter. Les astrophysiciens se sont demandé si Oph B-11 est assez dense pour s'effondrer. La très bonne résolution de l'IRAM leur a permis de déterminer que sa taille est du même ordre que celle du Système solaire, d'où l'on déduit que Oph B-11 est bien en train de se condenser. Ainsi, comme les étoiles, les naines brunes peuvent se former par effondrement gravitationnel direct d'un nuage de gaz et de poussières. En revanche, rien n'exclut à ce stade que d'autres naines brunes se soient formées par un mécanisme voisin de celui des planètes : la fragmentation du disque d'accrétion entourant une étoile en formation.

→ LES ANTÉNÉANDERTALIENS DE LA SOMME

Les lignées évolutives qui ont produit *Homo sapiens* en Afrique et *Homo neanderthalensis* en Europe ont divergé de celle de *Homo erectus* il y a quelque 500 000 ans, expliquaient récemment Giorgio Manzi et Fabio Di Vincenzo (voir « Le dernier ancêtre de l'homme moderne », *Pour la Science*, jan-



Un biface acheuléen, datant d'au moins 300 000 ans.

vier 2010, http://bit.ly/PLS411_Manzi). Or une pile sédimentaire découverte par une équipe de l'INRAP dirigée par David Hérisson fait apparaître les présences successives de membres de ces lignées dans un petit vallon de ce qui est aujourd'hui Étricourt-Manancourt dans la Somme.

Là, aux paléosols décarbonatés par l'acidité des pluies des périodes interglaciaires succèdent les épaisses couches de loess caractéristiques des entrées en glaciation, et elles sont chaque fois précédées par une couche archéologique. Datant de 350 000 à 300 000 ans, la plus ancienne a livré des bifaces, ces « couteaux de boucherie » caractéristiques de la taille acheuléenne pratiquée par *Homo erectus*, puis par les Anténéandertaliens.

Une glaciation plus tard, entre 240 000 et 190 000 ans, des Néandertaliens repassent et débitent des éclats. Puis, encore une glaciation plus tard, il y a quelque 80 000 ans, d'autres encore pratiquent une taille analogue. Ainsi, la transition entre la taille acheuléenne utilisée pendant 1,5 million d'années et le débitage Levallois qui lui succède est visible dans une seule et même séquence sédimentaire. Cela ne s'était jamais produit !

François Savatier

LA RENTRÉE DES SCIENCES CHEZ DUNOD



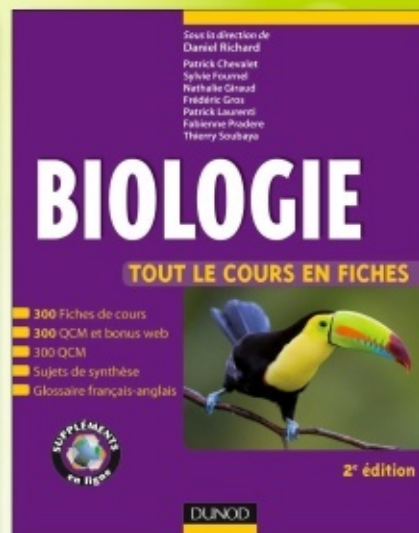
Sous la dir. d'Alain SEVIN *et al.*

Juin 2012 ■ 9782100570201 ■ 35 €
Prix de lancement 29 €
jusqu'au 31 octobre 2012



Sous la dir. de Daniel BOUJARD *et al.*

Juillet 2012 ■ 9782100564255 ■ 35 €
Prix de lancement 29 €
jusqu'au 31 octobre 2012



Sous la dir. de Daniel RICHARD *et al.*

Octobre 2012 ■ 9782100582235 ■ 45 €
Prix de lancement 39 €
jusqu'au 31 décembre 2012

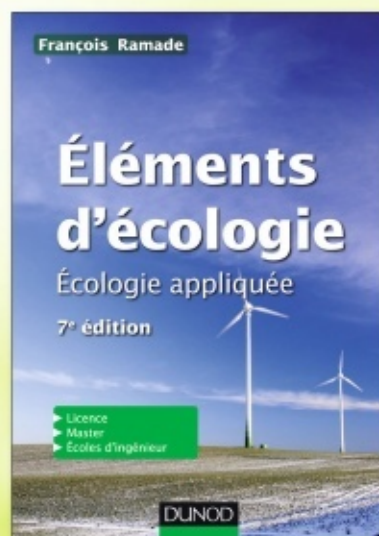
Collection « TOUT LE COURS EN FICHES »

- ◆ Des fiches de cours synthétiques et illustrées
- ◆ Des QCM pour s'évaluer
- ◆ Des exercices corrigés pour s'entraîner
- ◆ Des bonus web pour l'enseignant et pour l'étudiant



Richard B. PRIMACK, Jane LECOMTE,
François SARRAZIN

Août 2012 ■ 9782100567089 ■ 39 €



François RAMADE

Septembre 2012 ■ 9782100579815 ■ 69 €

Prix de lancement 59 €
jusqu'au 31 décembre 2012

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

+ www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

POINT DE VUE

La Réunion : une chasse aux requins inutile

À la suite des récentes attaques de plaisanciers par des requins, le « prélèvement » de squales pourrait être autorisé. Or une telle mesure ne réduirait en rien le risque.

Antonin BLAISON

Les attaques de requins suscitent toujours, à juste titre, l'émotion. À La Réunion, les dernières en date, le 23 juillet et le 5 août sur la côte Ouest de l'île, ont tué un surfeur et grièvement blessé un autre. Ces accidents font suite à une série noire en 2011, avec six attaques qui ont provoqué deux décès et une blessure grave. L'émotion, compréhensible, peut cependant conduire à des réactions hâtives et parfois inappropriées.

C'est ce qui risque de se passer dans le cas réunionnais. À l'heure où sont écrites ces lignes, les pouvoirs publics envisageaient d'autoriser le « prélèvement » de requins à La Réunion, c'est-à-dire leur pêche, y compris dans la zone de réserve marine. Une telle mesure est réclamée par certains acteurs de la société – pratiquants de sports nautiques soumis au risque, pêcheurs considérant les requins comme des concurrents, commerçants des stations balnéaires subissant les baisses de fréquentation. Or elle serait non seulement vaine, mais aussi nuisible, comme plusieurs arguments l'indiquent.

Le danger lié aux requins existe depuis toujours à La Réunion. Ainsi, entre 1980 et 2011, on a répertorié 36 attaques et 15 décès, les années les plus marquantes étant 1992 (quatre attaques, dont deux mortelles), 1997 (trois attaques), 2006 (trois attaques) et 2011. Il est difficile de conclure à une augmentation du nombre d'attaques dans ce département au fil des ans, les chiffres étant irréguliers (la décennie 2000 s'est ainsi distinguée par une accalmie) et trop faibles pour être statistiquement significatifs.

Au niveau mondial, cependant, la situation montre une tendance à la hausse plus claire : d'une vingtaine-trentaine d'attaques par an avant les années 1990, on est passé à environ 60-75 attaques par an actuellement, alors même que les populations de requins régressent globalement. Pour les spécialistes, cette hausse est surtout due à la forte augmentation du nombre de pratiquants de sports nautiques, de surfeurs en particulier.

Les événements de 2011 ont déclenché sur l'île de La Réunion une réaction salubre, les pouvoirs publics ayant décidé de mettre en place une concertation visant à mieux

EN L'ABSENCE D'INFORMATIONS scientifiques, une stratégie cohérente de gestion du risque est illusoire.

comprendre et gérer le risque lié aux requins – à La Réunion, on parlait de zéro ou presque. Cela a conduit à l'adoption rapide de dispositifs provisoires de prévention et de gestion des accidents (panneaux et drapeaux pour informer les vacanciers, filets de protection, personnes chargées de la vigilance, organisation des opérations de secours).

La concertation a également permis de constater que les connaissances scientifiques sur les requins de La Réunion étaient insuffisantes pour mettre en place une gestion efficace du risque. Certes, on sait que, parmi la trentaine d'espèces de requins présentes dans les eaux littorales de l'île, deux représentent un danger pour l'homme : le requin tigre (*Galeocerdo cuvier*), deuxième plus grand poisson prédateur après le célèbre requin

blanc, et le requin bouledogue (*Carcharhinus leucas*). Le requin tigre est autant pélagique (de haute mer) que côtier, et capable de migrer d'un océan à l'autre, tandis que le requin bouledogue est essentiellement côtier et plus sédentaire. Mais l'écologie et le comportement de ces espèces à La Réunion sont à étudier en détail, car une même espèce de requins peut avoir un mode de vie très différent suivant la zone considérée, tant à l'échelle mondiale que locale.

Un programme d'études sur 30 mois, dont l'acronyme est CHARC, a alors été mis en place sous l'égide de l'IRD (Institut de recherche pour le développement) afin de préciser l'écologie et les habitats des deux requins en question, sur la côte Ouest de l'île. Une autre étude a été lancée en mai dernier ; pilotée par la Région et réalisée par le bureau d'études *Biotope*, elle porte sur les mesures de protection qu'il serait possible d'appliquer à La Réunion.

Le programme CHARC consiste notamment à marquer à l'aide de balises acoustiques une centaine de requins tigres et bouledogues, et de suivre leurs déplacements à l'aide de stations d'écoute et de quelques caméras vidéo installées sous l'eau. La première phase de CHARC, qui en comportera trois, vient de s'achever. Elle apporte des premiers renseignements, mais qui doivent être consolidés et complétés par un suivi plus vaste et sur une plus longue durée.

Il se dégage notamment que les requins tigres, rarement détectés, sont absents près de la côte Ouest étudiée, ce qui suggère, comme on s'y attend, un habitat préférentiel situé au large. Quant aux requins boule-

dogues, ils passent l'essentiel de leur temps au large et semblent ne faire que des visites courtes et peu nombreuses près de la côte.

Un autre pan de la première phase de CHARC a consisté à étudier les statistiques des données historiques des attaques à La Réunion depuis 1980. Cela a permis d'associer à ces attaques certains facteurs tels que la turbidité des eaux et la période dans la journée (proche du coucher de soleil).

La suite du programme CHARC devra préciser tout cela et répondre à de nombreuses autres questions. Il s'agira en particulier de déterminer comment les conditions environnementales (turbidité, houle, salinité, température, aquaculture, zones de surf, présence d'autres espèces, d'effluents, etc.) influent sur les zones de prédilection des requins, leurs déplacements et leur comportement.

En l'absence de ces informations scientifiques, une stratégie cohérente de prévention du risque est illusoire. Mais on peut d'ores et déjà affirmer que des opérations de prélèvement de requins ne sont pas une solution, ni à court terme ni à long terme. Et cela indépendamment des préoccupations écologiques sur les requins et leur rôle dans la chaîne alimentaire des océans.

La forte capacité des deux espèces de requins à se déplacer sur l'ensemble de la côte, voire dans l'ensemble de l'océan Indien, montre que la pêche aux squales sera non seulement coûteuse, mais aussi inefficace, les requins présents à un instant donné et dans une zone donnée variant de façon aléatoire. Le prélèvement pourrait même produire l'effet inverse de celui recherché : on risque de prélever des requins plutôt côtiers, ce qui pourrait laisser le champ libre à des

requins plus pélagiques, tel le requin tigre. Par ailleurs, une traque des requins pourrait compromettre le programme de recherche CHARC, en perturbant les animaux et leur suivi.

Des opérations de prélèvement ne donneraient qu'un faux sentiment de sécurité et n'apporteraient aucun élément utile à la gestion du danger à long terme. En attendant les résultats des études lancées, il est préférable d'informer le mieux possible les plaisanciers des risques qu'ils prennent. ■

Antonin BLAISON, spécialiste du comportement des requins, est ingénieur de recherche à l'IRD. Il participe au programme CHARC.

International Shark Attack File (site du Muséum de Floride) : www.flmnh.ufl.edu/fish/sharks/isaf/isaf.htm

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Vers un ciment durable : partir de l'échelle atomique

Le ciment est omniprésent dans nos infrastructures. En étudiant ses propriétés à toutes les échelles, on tente d'améliorer son bilan écologique.

Roland Pellenq

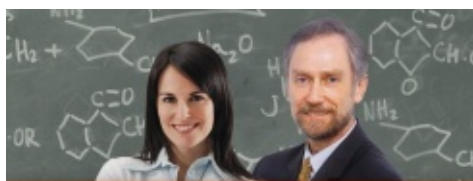
La fabrication du ciment est responsable de cinq à dix pour cent des émissions industrielles de dioxyde de carbone. Sous sa forme hydratée, ce matériau est la « colle » qui donne ses propriétés mécaniques au béton, constitué d'agrégats (tels que des graviers) liés par des hydrates cimentaires. Mélangé à de l'eau, le ciment passe d'une pâte quasi liquide à un matériau plus dur que la plupart des minéraux – on le surnomme d'ailleurs « pierre liquide ». La prise du ciment, et donc du béton, en une dizaine d'heures, permet la construction et la réparation rapides d'ouvrages variés (chaussées, ponts, bâtiments,

voies navigables, centrales nucléaires...). Le béton est essentiel aux infrastructures modernes, qui se multiplient avec l'urbanisation – plus de la moitié de la population mondiale (soit plus de trois milliards d'individus) vit aujourd'hui en ville. En moyenne, chaque habitant de la planète consomme annuellement 2,8 tonnes de ce matériau, qui alimente un marché mondial d'environ 30 milliards d'euros par an.

Aucun matériau connu n'est susceptible de remplacer le béton, dont le coût et la disponibilité sont inégalés. Dès lors, il est crucial d'élaborer un béton – et donc un ciment – « durable ». C'est ce qu'on s'ap-

plique à faire par une nouvelle approche, où l'on part de l'échelle atomique pour comprendre et améliorer les propriétés macroscopiques du ciment.

Les hydrates cimentaires se forment par dissolution et précipitation d'une poudre grise de ciment, que l'on mélange avec de l'eau. Cette poudre est fabriquée localement à partir de calcaire et d'argile, abondants dans la nature. Ils sont mélangés, puis chauffés à environ 1 500 °C dans un grand four rotatif, mesurant jusqu'à 200 mètres de longueur. Le dioxyde de carbone est émis à la fois par la combustion (de fuel, de charbon...) lors du chauffage et par la décomposition



→ 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

du calcaire (CaCO_3). Une cimenterie peut produire jusqu'à 10 000 tonnes par jour de grains de ciment, collectivement nommés clinker. Ces grains sont ensuite broyés en une fine poudre grise et mélangés à du gypse. L'énergie électrique utilisée pour le broyage représente quatre pour cent de la production d'électricité mondiale.

Pour évaluer la durabilité du béton, on doit estimer les coûts économiques, environnementaux, énergétiques et sociétaux des structures construites avec ce matériau. En d'autres termes, il faut effectuer l'analyse « du berceau à la tombe », c'est-à-dire prendre en compte le cycle de vie complet des structures. On montre ainsi que pour un bâtiment, l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux et à la construction représente 10 à 40 pour cent de la consommation totale d'énergie (estimée pour une durée de vie de 70 ans), le reste correspondant à la phase d'utilisation (chauffage, climatisation...). Il est donc essentiel de ne pas négliger cette dernière phase : on cherche par exemple à mieux comprendre le transport de la chaleur dans le matériau et les phénomènes de détérioration, telle l'apparition de fissures, afin de rendre le béton plus isolant et de réduire la consommation énergétique des nouvelles infrastructures.

Jusque récemment, pour améliorer le ciment et le béton, on adoptait une approche itérative descendante ou *top-down* : on testait les propriétés à l'échelle macroscopique, on cherchait à les comprendre par une analyse à l'échelle immédiatement inférieure (de l'ordre du micromètre), on modifiait le matériau et on testait à nouveau les propriétés macroscopiques. Aujourd'hui, une nouvelle approche, dite *bottom-up* (ascendante), se développe. L'analyse commence à l'échelle nanométrique (10^{-9} mètre), où le matériau est décrit comme un assemblage d'atomes et de molécules. Elle fournit les paramètres pertinents pour l'échelle du dessus, et ainsi de suite jusqu'à l'échelle macroscopique.

Plusieurs axes de recherche sont considérés. Le premier consiste à baisser la température de production du clinker, afin de diminuer les émissions de dioxyde de car-

bone. Le deuxième est de développer un processus de broyage du clinker plus économique en énergie, en analysant la fracturation mécanique des grains. Le troisième étudie la dissolution de la poudre de ciment, à la fois par l'expérience et par la modélisation, grâce à des calculs dits *ab initio* (littéralement : depuis le début) sur la réactivité de surface des grains. Le quatrième

EN MODIFIANT LA COMPOSITION chimique, on pourrait utiliser moins de ciment pour construire un bâtiment.

concerne la précipitation de la poudre dissoute, abordée notamment par le biais de simulations multi-échelles combinant approches atomistiques et colloïdales (on se place respectivement à l'échelle des atomes et à celle de particules plus grosses en suspension dans la solution). Enfin, le cinquième porte sur le comportement mécanique de la pâte durcie en fonction de la composition chimique.

Les premiers résultats commencent à être obtenus, notamment grâce à ce cernier axe de recherche. Ainsi, nous avons montré qu'en diminuant le rapport Ca/Si (le nombre d'atomes de calcium sur celui de silicium) de 1,7 à 1, les performances mécaniques du ciment (durée de vie, résistance...) sont multipliées par 1,5 à 2. En modifiant la composition chimique, on pourrait donc utiliser moins de ciment pour construire un bâtiment, ce qui réduirait les émissions de dioxyde de carbone et la consommation d'énergie associées à la fabrication de ce matériau.

Pour avoir un impact important, l'approche *bottom-up* nécessitera une collaboration active des industriels concernés. À ce prix, nous pourrions optimiser les propriétés du ciment, et ainsi améliorer la durabilité des infrastructures. ■

Roland PELLENO est directeur de l'Unité mixte internationale « Multi-scale materials science for energy and environment » (MSE), comportant des chercheurs du CNRS et du MIT, et installée à Cambridge, aux États-Unis.

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.



OFFRE SPÉCIALE
POUR LES MOINS DE 30 ANS

**100 €
OFFERTS***

sur vos assurances
AUTO et SANTÉ
Idéal pour bien débiter !

Pour découvrir les avantages qui vous sont réservés :

- Appelez le 0 970 809 809 (numéro non surtaxé)
- Connectez-vous sur www.gmf.fr



Assurément Humain

* Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la première année à la souscription d'un contrat d'assurance auto et/ou d'un contrat de complémentaire santé. Offre non cumulable avec le tarif avant-âge 30 et valable jusqu'au 31/12/2012. Conditions et détails des prestations dans votre agence GMF ou sur www.gmf.fr.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle. Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75657 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, GMF Vie, Assistance Protection Juridique et Fidélité Assistance - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle. Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Chartres 323 562 678 - Siège social : 7, avenue Marcel Proust 28932 Chartres Cedex 9. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

Les contrats complémentaires santé sont souscrits par l'AD.A.C.C.S. auprès de GMF Assurances et La Sauvegarde.



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr

ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ POINCARÉ FAIT TOURNER LA TÊTE

Dans *Poincaré et la rotation de la Terre*, de J.-M. Ginoux et Ch. Gerini

(*Pour la Science* n° 417, juillet 2012, http://bit.ly/417_poincare), on apprend

qu'on ne peut pas prouver

que la Terre tourne, car il n'existe pas de référentiel absolu. Pourquoi, alors, affirmer que la Terre tourne ?

Martin Maussac

→ RÉPONSE DES AUTEURS

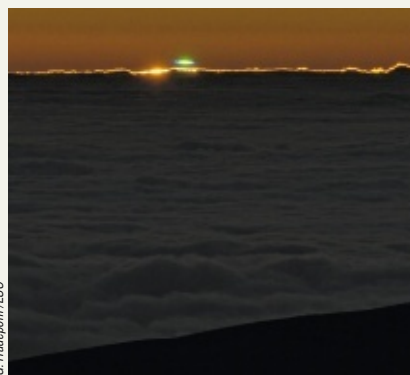
Bien qu'il ait participé le 22 octobre 1902 à l'inauguration de la réinstallation du pendule de Foucault au Panthéon, Henri Poincaré fit remarquer que cette expérience ne prouvait pas la rotation de la Terre, puisque nous ne pouvons observer que des mouvements relatifs.

Le 26 octobre 1902, le chroniqueur scientifique du journal *La Croix* relata ainsi l'expérience : « Sous l'action de la pesanteur, le pendule, écarté de la verticale, y reviendra par une série d'oscillations successives s'effectuant dans un plan fixe, puisqu'aucune force n'agit pour changer ce plan, et comme la Terre tourne au-dessous du pendule, le plan d'oscillation de ce dernier paraîtrait tourner relativement à la Terre en sens contraire de la rotation [...]. En visant une étoile située dans le plan d'oscillation, le pendule ne la quittera donc pas, tant que durera l'expérience. »

L'étoile visée est généralement l'étoile polaire ou Bêta du Centaure, considérées suffisamment éloignées de la Terre pour sembler immobiles, et de ce fait qualifiées d'« étoiles fixes ». Cependant, au voisinage du Soleil, la vitesse relative des étoiles – et donc des étoiles dites fixes – est de l'ordre de 20 kilomètres par seconde. Ce résultat était déjà connu à l'époque de Poincaré. Ainsi, les étoiles auxquelles on se réfère ne constituant pas un référentiel absolu, on ne peut affirmer que l'expérience du pendule prouve que la Terre tourne.

Toutes les observations vont dans le même sens : aplatissement de la Terre aux pôles, déviation vers l'Est lors de la chute libre, etc. On est obligé d'admettre que la Terre tourne, mais, dans la mesure où l'on ne peut observer que des mouvements relatifs, on ne peut pas le prouver.

Un autre élément a cependant joué un rôle important dans la polémique suscitée par Poincaré : la beauté et la simplicité de l'expérience du pendule de Foucault, qui fournit une démonstration évidente de la rotation de la Terre, rendue ainsi accessible à tous. Ce qu'on ne pardonna pas à Poincaré, ce n'est pas tant d'avoir remis en cause la rotation de notre globe, mais plutôt d'avoir pointé du doigt un défaut rédhibitoire dans cette démonstration « populaire ».



Le rayon vert, vu de l'Observatoire de Paranal (désert de l'Atacama, Chili), où est installé le grand télescope VLT de l'ESO (l'Observatoire européen austral).

✓ RAYON VERT DANS UN CIEL PAS BLEU

Dans *Pourquoi le ciel n'est pas bleu*

(*Pour la Science* n° 418, août 2012, http://tiny.cc/418_idphys),

J.-M. Courty et É. Kierlik expliquent

le rougissement du ciel au coucher

du Soleil, mais n'évoquent pas

le mystérieux « rayon vert »

que l'on peut en théorie observer juste

avant que le Soleil ne disparaisse

derrière l'horizon. Quelle est l'origine

de ce rayon vert et dans quelles

conditions se manifeste-t-il ?

Pierre Richet-Gaudin

→ RÉPONSE DES AUTEURS

Le mystérieux rayon vert évoqué par notre lecteur est un phénomène exceptionnel, mais bien réel, dont on pourra avoir un aperçu photographique en consultant l'ouvrage *Aurores*,

mirages, éclipses de D. K. Lynch et W. Livingston (Dunod, 2002).

Pour le comprendre, la physique évoquée dans *Pourquoi le ciel n'est pas bleu*, la diffusion préférentielle par l'atmosphère de la lumière bleue, ne suffit pas : il faut y ajouter le phénomène de réfraction atmosphérique et la dispersion chromatique qui lui est associée. L'atmosphère n'est pas un milieu homogène, sa densité moléculaire décroît avec l'altitude. Il s'ensuit que l'indice de réfraction diminue aussi. En vertu des lois de Snell-Descartes, comme dans le phénomène de mirage, les rayons lumineux ne se propagent alors pas selon une trajectoire rectiligne. Ils se réfractent progressivement avec une courbure dirigée vers le milieu le plus dense, donc vers la Terre.

Une première conséquence est que la position apparente du Soleil est plus haute sur l'horizon que sa position réelle. L'effet est très faible, mais suffisant pour qu'à son coucher, alors que le Soleil semble effleurer l'horizon, il est en réalité déjà dessous.

En outre, comme pour l'eau ou le verre, l'indice de réfraction de l'air dépend de la couleur. L'atmosphère se comporte donc comme un prisme qui dévie davantage le bleu et le vert que le jaune ou le rouge.

De ce fait, on peut imaginer que le Soleil que nous voyons se coucher est constitué de la superposition, en descendant vers l'horizon, d'un soleil bleu, d'un soleil vert, d'un soleil jaune, d'un soleil rouge, etc. À cause du phénomène de diffusion (discuté dans notre chronique d'août), le soleil bleu a pratiquement disparu au niveau de l'horizon et il subsiste un peu du soleil vert. Le soleil rouge prédomine, mais comme ses rayons sont moins déviés, il disparaît entièrement le premier. C'est à ce moment que notre œil peut saisir fugitivement l'extrémité supérieure du soleil vert qui n'a pas encore totalement disparu : c'est le fameux rayon vert.

Les écarts entre tous ces soleils étant très faibles, même à l'horizon, l'observation du phénomène est difficile et nécessite pour le moins un horizon bien dégagé et une atmosphère limpide et calme. L'un de nous a cru apercevoir le rayon vert sur les côtes atlantiques, mais rien n'est moins sûr...

VRAI OU FAUX

Les cigarettes *light* sont-elles moins toxiques ?

Non. La fumée toxique est diluée par un apport d'air grâce à des trous dans le filtre, mais le fumeur compense en aspirant plus fort à chaque bouffée.

Guillaume Jacquemont

De nombreux fumeurs consomment des cigarettes *light*. Lancées en 1971 par la Société *Marlboro*, elles étaient à l'origine destinées aux femmes, qui recherchaient des cigarettes plus douces. Le qualificatif *light* laisse penser qu'elles sont moins nocives. Qu'en est-il réellement ?

On sait depuis les années 1960 que le tabac est toxique. Selon Marion Adler, responsable de l'Unité de consultation de tabacologie de l'Hôpital Antoine Béclière, à Clamart, la fumée du tabac contient quelque 4 000 substances toxiques (goudrons, monoxyde de carbone, ammoniac, mercure...). Elle peut déclencher des cancers du poumon, mais également d'autres cancers, tels ceux de la vessie, des voies digestives, des voies aériennes supérieures, de la sphère nez-gorge-oreilles ou du sein chez la femme. Elle entraîne également des risques d'insuffisance respiratoire et de maladies cardio-vasculaires.

En revanche, la nicotine n'est pas toxique, mais, associée à d'autres molécules, elle crée une dépendance. Quelque 95 pour cent des fumeurs sont dépendants à la nicotine, c'est-à-dire qu'ils ont besoin d'une quantité quotidienne de cette substance. Certains deviennent dépressifs quand ils en sont privés. Seulement cinq pour cent des fumeurs se contentent d'une cigarette occasionnelle, par exemple lors d'une soirée, avec des arrêts de plusieurs jours.

La dépendance à la cigarette est de deux types. Physique, d'abord : le manque

de nicotine entraîne stress et angoisse chez le sujet, qui ne parvient plus à se concentrer et ne pense plus qu'à fumer. Cela est dû aux récepteurs nicotiques présents dans le cerveau. Quand la nicotine s'y fixe, elle déclenche la libération de catécholamines (dopamine, sérotonine, noradrénaline...), qui suscitent une sensation de bien-être et diminuent l'angoisse et le stress. Les neurones du fumeur perdent peu à peu leur capacité à libérer des catécholamines sans stimulation par la nicotine, d'où la sensation de manque en l'absence de cigarette.

Le second type de dépendance est d'ordre psychologique : le fumeur a besoin de sa cigarette associée à un lieu, à l'ambiance, aux autres qui fument... Elle est plus difficile à gérer si le sujet est en manque physique, que peuvent compenser des substituts nicotiques, par exemple sous forme de patchs ou de comprimés à sucer – bien qu'ils restent à améliorer selon certains scientifiques.

Une composition voisine

Absorbe-t-on moins de nicotine et de substances toxiques quand on fume des *light* ? En réalité, non. La composition des fumées est voisine. Les cigarettes *light* ont juste un filtre percé de petits trous latéraux ; le fumeur aspire de l'air, qui rentre par les trous et dilue la fumée, mais il tire alors plus sur sa cigarette pour absorber la même dose de nicotine. En outre, il obstrue souvent inconsciemment les trous avec les doigts.

Enfin, le risque est le même. La mention *light* est désormais interdite dans de nombreux pays, notamment en Europe et aux États-Unis, car on considère qu'elle trompe le consommateur sur la nocivité réelle de ces cigarettes.

Pourrait-on élaborer une vraie « cigarette propre », en créant un tabac dépourvu de substances toxiques ? Selon M. Adler, c'est impossible, car la plupart de ces substances sont des résidus inévitables de la combustion. On les retrouve d'ailleurs dans toutes les fumées, notamment celle d'un feu de cheminée. On développe alors des produits tels que des inhaleurs de nicotine, petits cylindres sur lesquels le fumeur « tire » comme sur une cigarette et qui contiennent un coton imbibé de nicotine.

Quant à la cigarette électronique, apparemment il y a quelques années, un certain flou juridique et technique règne autour d'elle. Le principe consiste à vaporiser (souvent à l'aide d'une résistance chauffante) une solution aromatisée dans le tube de la cigarette, la vapeur remplaçant la fumée produite par la combustion du tabac. Cependant, la composition de cette solution aromatisée est variable et peu réglementée, et on manque d'études prouvant que les vapeurs émises ne sont pas toxiques. Dans l'état actuel des connaissances, les tabacologues ne peuvent recommander cette cigarette. ■

Guillaume JACQUEMONT est journaliste à *Pour la Science*.



La saga du boson de HIGGS

Cent ans de particules

par Jeremy Bernstein

page 23

Le boson de Higgs, et après ?

par John Ellis

page 30

Avec l'annonce de la découverte d'une nouvelle particule au CERN, le 4 juillet 2012 est une date qui marquera la physique. S'agit-il du boson de Higgs tant attendu ? Cette pièce clef manquait au puzzle – le « modèle standard » de la physique des particules – assemblé avec peine au XX^e siècle par les théoriciens qui cherchaient à comprendre la zoologie des particules subatomiques et leurs interactions (*voir Cent ans de particules, page 23*).


Les physiciens pensent que la nouvelle particule est bien le boson de Higgs. Mais ils doivent s'en assurer, et en étudier les propriétés pour répondre aux questions encore ouvertes et dépasser le modèle standard (*voir Le boson de Higgs, et après ?, page 30*).



Cent ans de particules

Jeremy Bernstein

La probable mise en évidence du boson de Higgs, au CERN, est une étape historique dans l'étude des particules élémentaires et de leurs interactions. Elle couronne un siècle de théories et de découvertes.

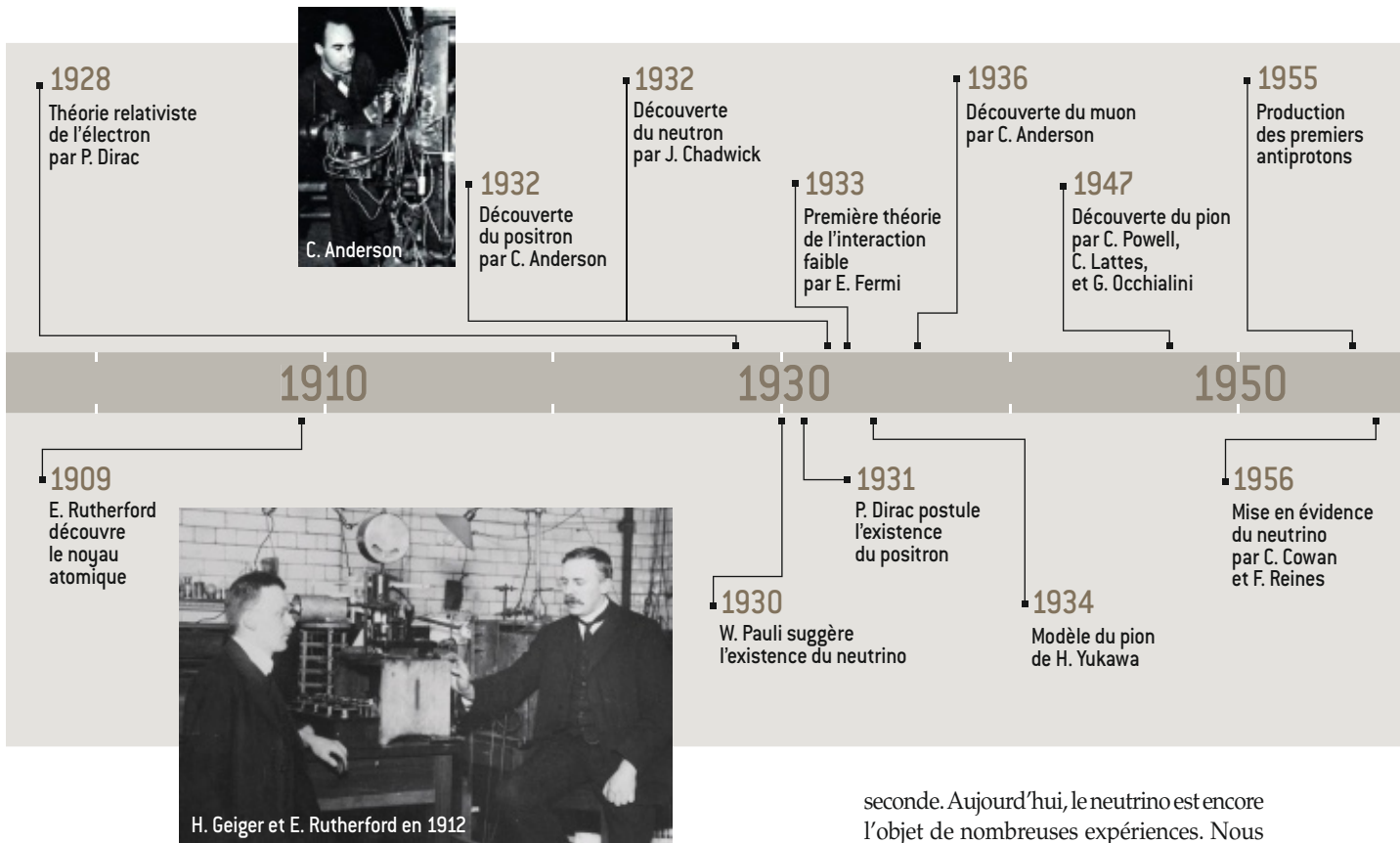


La physique des particules élémentaires au XX^e siècle a profondément changé la compréhension du monde. Les avancées ont été ponctuées par le développement de théories confirmées par l'expérience, mais aussi par la découverte inattendue de particules qui ont inspiré de nouveaux modèles. Dans cet article, je vais illustrer une centaine d'années de recherches en me focalisant sur cinq particules qui ont joué un rôle important dans cette histoire : le neutrino, le méson π , l'antiproton, le quark et le boson de Higgs.

Commençons par le neutrino. Son existence a été postulée dans des circonstances extravagantes. Le 4 décembre 1930, le physicien autrichien Wolfgang Pauli envoya une lettre à des collègues qui assistaient à une conférence de physique à Tübingen, en Allemagne. Le document commençait par ces termes : « Chers Mesdames et Messieurs radioactifs. » Pauli s'excusait de n'avoir pas pu venir à la conférence, car il allait à un bal à Zurich... Il y faisait aussi part d'un problème qui le préoccupait : une anomalie détectée dans les expériences sur la « désintégration bêta ».

Certains noyaux radioactifs se désintègrent en formant un nouveau noyau et en émettant un électron. Si l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées dans cette désintégration dite bêta, alors l'électron devrait être émis avec une énergie bien déterminée. Or l'expérience montrait que l'énergie des électrons produits couvre un intervalle continu de valeurs. C'était une telle énigme que le Danois Niels Bohr avait même proposé

1. LA COLLISION D'UN ANTIPROTON (\bar{p}) avec un noyau de néon (Ne) produit plusieurs particules dont un pion (π^+), un muon (μ^+), un positron (e^+), ainsi que des neutrinos invisibles pour le détecteur. Ces particules ont toutes été découvertes au cours du XX^e siècle.



L'ESSENTIEL

- La compréhension des interactions fondamentales de la matière a notablement progressé au cours du XX^e siècle grâce à l'effort conjoint des théoriciens et des expérimentateurs.
- Des particules telles que le neutrino, le pion, l'antiproton ou le quark ont été prévues par les théoriciens avant d'être mises en évidence expérimentalement.
- Le modèle standard décrit les interactions électrofaible et forte dans un ensemble cohérent. La découverte du boson de Higgs conforte cette théorie.

que l'énergie et la quantité de mouvement puissent ne pas être conservées au cours de la désintégration. Pauli trouvait cette idée absurde, et il fit, dans sa lettre, une contre-proposition. Il avança l'hypothèse qu'une autre particule, électriquement neutre et interagissant très peu avec la matière, donc difficile à détecter, était émise en même temps que l'électron. Cette particule emporterait une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement, et expliquerait le spectre continu de l'énergie des électrons émis dans les désintégrations bêta.

À Rome, Enrico Fermi prit cette suggestion au sérieux et développa la première théorie de la désintégration bêta. Il nomma la particule « neutrino », le petit neutre en italien, pour la distinguer du neutron, à savoir le composant électriquement neutre du noyau atomique, découvert en 1932 par le Britannique James Chadwick.

Le statut réel ou hypothétique du neutrino ne fut tranché qu'en 1956. Les physiciens américains Clyde Cowan et Frederick Reines installèrent un détecteur près de la centrale nucléaire à Savannah River, car une grande quantité de désintégrations bêta avaient lieu dans le cœur du réacteur. Ils mirent en évidence la présence de neutrinos, dans un flux de plus de 10000 milliards de particules par centimètre carré et par

seconde. Aujourd'hui, le neutrino est encore l'objet de nombreuses expériences. Nous savons qu'il existe en trois types – ou saveurs –, de masses faibles mais non nulles, et que les neutrinos changent périodiquement de saveur au cours du temps, un phénomène nommé oscillation.

La radioactivité bêta avait été étudiée en particulier par Ernest Rutherford, physicien d'origine néo-zélandaise qui avait aussi travaillé sur les deux autres formes de radioactivité (alpha et gamma). En 1909, à Manchester, assisté de deux collègues, il utilisa des particules alpha (des noyaux d'hélium) pour sonder la structure de l'atome. Rutherford découvrit que l'essentiel de la masse de l'atome est concentré dans un tout petit volume chargé positivement : le noyau.

Mais il s'avéra bientôt que le noyau ne se résumait pas à des particules de charge positive, que l'on nomma protons. En effet, le noyau d'hydrogène, avec une charge positive, est quatre fois plus léger que l'hélium, qui a seulement deux charges positives. Rutherford suggéra donc la présence d'objets neutres dans le noyau. Il supposa qu'il s'agissait de protons et d'électrons liés ensemble, mais, dès 1930, Pauli et d'autres établirent qu'un tel édifice ne correspondait pas aux données des spectres atomiques. La solution vint avec la découverte du neutron par Chadwick. Une question demeura

1961
Théorie électrofaible
de S. Glashow



M. Gell-Mann

1961
Modèle de la voie
octuple
de M. Gell-Mann

1961
Y. Nambu et J. Goldstone
développent le principe
de brisure spontanée
de symétrie

1967
S. Weinberg et A. Salam
intègrent le mécanisme
de Higgs à la théorie
électrofaible

1968
Mise en évidence
des quarks
à l'accélérateur
linéaire de Stanford

1970

1990

2010



W. Pauli et N. Bohr en 1954, jouant avec une toupie.

1964
P. Higgs, R. Brout
et F. Englert appliquent
le mécanisme de brisure
spontanée de la symétrie
à la physique
des particules

1964
Découverte
de la particule Ω^-

1964
Hypothèse
de l'existence
des quarks
par M. Gell-Mann

1983
Découverte
des bosons W et Z
au CERN

2012
Découverte
d'une nouvelle
particule au CERN,
probablement
le boson de Higgs

rait : quelle force assure la cohésion du noyau, formé de protons et de neutrons ?

Pour maintenir ensemble les nucléons (les protons et les neutrons), il devait exister une interaction plus intense que la répulsion électrostatique entre les protons chargés positivement. Cette force devait aussi être de courte portée pour n'agir qu'au sein du noyau. Telles sont les données de l'énigme à laquelle s'est intéressé le Japonais Hideki Yukawa. Selon lui, le neutron était une particule élémentaire, et il utilisa cette hypothèse pour élaborer sa propre théorie des interactions nucléaires.

Yukawa imagina que la force assurant la cohésion du noyau était véhiculée par une particule de masse non nulle. Il détermina la valeur du couplage de cette particule avec les nucléons pour qu'elle domine la répulsion électrostatique entre les protons. De surcroît, la mécanique quantique indiquait que la portée de la force diminue quand la masse de la particule médiatrice augmente. La connaissance de la taille des noyaux permit donc à Yukawa d'estimer la portée de l'interaction. Il en déduisit que la masse de la par-

ticule devait être environ 200 fois celle de l'électron. En 1934, il publia, dans une prestigieuse revue scientifique japonaise, un article, dans un anglais parfait, mais qui est resté complètement ignoré.

Maintenir la cohésion du noyau

Le principe de véhiculer une interaction par l'échange de particules est bien représenté par les diagrammes inventés par l'Américain Richard Feynman dans les années 1940. Feynman a utilisé ces diagrammes et les expressions mathématiques qu'ils symbolisent pour décrire l'interaction de particules portant une charge électrique. Il a ainsi développé la théorie de l'électrodynamique quantique, où la force électromagnétique résulte de l'échange de photons (voir la figure 2a).

Comme dans la théorie électrostatique classique, l'intensité de la force décroît en proportion inverse du carré de la distance entre les deux corps chargés, propriété due à la masse nulle de la particule échangée (le photon). Pour la théorie de Yukawa, la portée de la force est beaucoup plus limitée, car la particule échangée entre le proton et le neutron a une masse non nulle (voir la figure 2b).

La particule de Yukawa a été découverte en 1947 dans les rayons cosmiques – les particules énergétiques circulant

dans l'espace. Elle a été nommée méson π , ou pion. Elle a une masse proche de celle prévue par Yukawa et existe en trois variétés, selon que sa charge électrique est positive, négative ou nulle. Les pions chargés se désintègrent rapidement en neutrinos et en muons (versions lourdes de l'électron).

Parallèlement à l'étude du noyau, les physiciens se sont aussi intéressés à l'électron. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger développa l'équation qui, en mécanique quantique, décrit l'évolution dans le temps de la particule. En 1928, le Britannique Paul Dirac chercha à étendre cette équation au cas d'électrons relativistes – animés de vitesses proches de celle de la lumière. Mais sa nouvelle équation présentait une difficulté. Pour chaque valeur de la quantité de mouvement, il obtenait quatre solutions : deux correspondaient à un électron d'énergie positive, les deux autres semblaient correspondre à une énergie négative, ce qui n'a pas de sens physique. Dirac comprit que ces dernières solutions ne correspondaient pas à un électron, mais à une particule ayant les mêmes propriétés, à part une charge électrique opposée, positive. Les énergies associées sont alors positives. Cet antiélectron – ou positron – fut découvert en 1932 par le physicien américain Carl Anderson dans les rayons cosmiques.

L'électron et le positron étaient le premier exemple d'une propriété générale : à toute particule, on peut associer

une antiparticule. Elles ont la même masse, mais, si une particule a une charge q , alors l'antiparticule a une charge $-q$. Dans quelques cas, comme celui du photon ou du pion neutre, particules et antiparticules sont identiques. Ce n'est cependant pas le cas de toutes les particules neutres (voir l'encadré ci-dessous). Lorsqu'une particule et une antiparticule interagissent, elles peuvent s'annihiler très vite en produisant des photons. D'où la difficulté d'observer des antiparticules.

Les physiciens étudièrent la possibilité de produire des antiprotons dans un accélérateur de particules – un environnement bien contrôlé pour éviter l'annihilation rapide. La collision d'un proton sur une cible de protons sous forme d'hydrogène liquide peut produire trois protons et un antiproton. C'est la réaction la plus simple qui respecte la conservation de la charge électrique. Un calcul montre que le proton incident doit atteindre une énergie équivalente à environ six fois la masse du proton pour pouvoir produire un antiproton. La construction du *Beva-*

tron (raccourci de *Billions of eV Synchrotron*, synchrotron à plusieurs milliards d'électronvolts), à l'Université de Californie à Berkeley, permit la première observation de l'antiproton en 1955.

Au cours des années 1940 et 1950, un grand nombre de particules ont été découvertes. Les physiciens étaient perplexes : cela faisait beaucoup de particules élémentaires. Comme pour le tableau des éléments de Mendeleïev, une structure sous-jacente devait exister et mettre de l'ordre dans cette avalanche de particules.

Un ordre sous-jacent

En mars 1963, j'assistai à une conférence donnée par Murray Gell-Mann à l'Université Columbia. Il venait d'inventer un système pour classer certaines particules. Son modèle était fondé sur un groupe particulier de symétries. Cela permettait de rassembler certaines particules, malgré leurs différences apparentes, dans des sous-ensembles, nommés multiplets. L'un des premiers multiplets identifiés fut celui

contenant le pion, et il regroupait huit particules (voir la figure 3). M. Gell-Mann avait nommé sa théorie, un peu pour plaisanter, la « voie octuple ». Bouddha avait enseigné qu'un noble chemin octuple mènerait à la disparition de la souffrance... La théorie de M. Gell-Mann permettait de mettre de l'ordre dans le déluge déconcertant de particules que personne n'avait prédites ou comprises.

Lors de cet exposé, Robert Serber, un brillant physicien de l'Université Columbia, souligna que la représentation la plus simple qui émerge de la théorie est un multiplet constitué de trois particules seulement. M. Gell-Mann avait-il envisagé cela ? Oui, mais il n'arrivait pas à construire une théorie cohérente. L'idée était d'utiliser ces trois particules comme briques élémentaires pour construire toutes les autres particules. Fermi, par exemple, avait déjà envisagé que les pions étaient des composés du neutron, du proton et de l'antiproton. Le pion de charge négative était censé être composé d'un neutron et d'un antiproton. Mais une fois que les particules dites

Fermions, bosons, leptons, hadrons, baryons, mésons...

Les particules ont plusieurs propriétés qui permettent de les regrouper en familles. Une première distinction se fait en fonction du spin – moment cinétique intrinsèque – de la particule. Si le spin a une valeur entière (dans les unités atomiques), la particule est un boson ; s'il est demi-entier, il s'agit d'un fermion. Les fermions respectent le principe d'exclusion de Pauli, qui interdit que deux particules identiques se trouvent exactement dans le même état quantique. Ce n'est pas le cas des bosons. Les constituants de la matière sont des fermions, alors que les particules échangées lors des interactions (le photon, γ , pour l'interaction électromagnétique, les bosons W et Z pour l'interaction faible et les gluons, g, pour l'interaction forte) sont des bosons.

Parmi les fermions, on distingue la famille des leptons, qui sont insensibles à l'interaction forte. Trois leptons sont chargés : l'électron (e), le muon (μ) et le tau (τ). À chacun d'eux est associé un lepton neutre : le neutrino électronique (ν_e), le neutrino muonique (ν_μ) et le neutrino tauique (ν_τ). On a ensuite les six quarks,

insensibles à l'interaction forte : trois de charge électrique $+2/3$ (l'électron ayant par définition une charge -1), le u, le c et le t, et trois quarks de charge $-1/3$, le d, le s et le b. Ces quarks n'existent que sous la forme

de baryons, que l'on regroupe sous le terme de hadrons.

La découverte du baryon Ω^- , composé de trois quarks s, semblait violer le principe d'exclusion de Pauli que les quarks sont censés respec-

ter. Pour résoudre cette difficulté, les physiciens ont supposé que les quarks portent une charge quantique associée à l'interaction forte, analogue à la charge électrique, nommée couleur et qui existe sous trois formes.

Un hadron doit être de couleur neutre. Ainsi, les trois quarks s du Ω^- ne sont pas dans le même état, chacun portant une couleur différente. Dans le cas des mésons, le quark porte une couleur et l'antiquark porte l'anticouleur associée.

L'antiquark est une antiparticule qui a la même masse que le quark associé, mais toutes ses charges quantiques sont opposées, notamment sa charge électrique et sa couleur. Toutes les particules du modèle standard ont une antiparticule. Dans certains cas, la particule et l'antiparticule sont identiques ; c'est le cas du photon. Mais, si le neutron est électriquement neutre, il n'est pas sa propre antiparticule : il est composé de deux quarks d et d'un u, alors que l'antineutron est composé de deux antiquarks \bar{d} et d'un antiquark \bar{u} .

Le cas des neutrinos n'est pas tranché pour l'instant. L'antineutrino pourrait être différent du neutrino, auquel cas on qualifie le neutrino de « particule de Dirac ». Mais le neutrino pourrait aussi être sa propre antiparticule ; on parle dans ce cas de « particule de Majorana », du nom du physicien italien Ettore Majorana.

	Fermions			Bosons
Quarks	$2/3$ u	$2/3$ c	$2/3$ t	0 γ
	$-1/3$ d	$-1/3$ s	$-1/3$ b	0 g
	0 ν_e	0 ν_μ	0 ν_τ	0 Z
Leptons	-1 e	-1 μ	-1 τ	± 1 W

Charge électrique

d'états liés. Trois quarks forment un baryon, tels le proton ou le neutron, et c'est un fermion. La combinaison d'un quark et d'un antiquark forme un méson, tels le pion ou le kaon, et c'est un boson. Baryons et mésons sont des particules composites sensi-

étranges ont commencé à être découvertes, le modèle de Fermi ne fonctionnait plus.

Le physicien japonais Soichi Sakata avait introduit un modèle avec trois particules supposées élémentaires : le neutron, le proton et le Λ^0 , une particule étrange découverte en 1947. Bien qu'il fût possible de faire apparaître toutes les particules connues à partir de ces trois-là, le système n'était pas satisfaisant. On ne voyait pas en quoi ces trois particules étaient plus élémentaires que les autres. De surcroît, le modèle prédisait des particules qui n'ont jamais été trouvées. Et il n'était pas compatible avec la voie octuplet, qui semblait fonctionner.

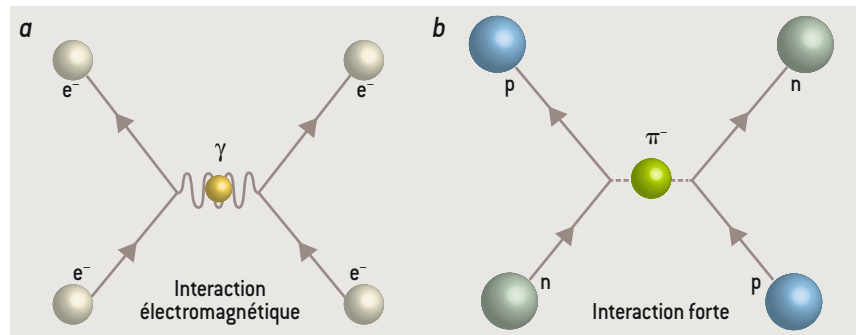
Il n'y avait aucune raison pour que le triplet de la voie octuplet contienne des particules connues. M. Gell-Mann introduisit donc trois particules hypothétiques qu'il appela *up* (*u*), *down* (*d*) et *strange* (*s*). Il les nomma quarks.

Il restait à combiner ces particules pour former le proton, le neutron, le Λ^0 et toutes les autres particules connues en s'assurant qu'on retrouvait par exemple la bonne charge électrique. Cela ne fonctionnait pas si on essayait d'attribuer aux quarks des charges électriques égales à des multiples entiers de celle de l'électron. Or toutes les particules observées dans la nature avaient des charges entières...

Des charges fractionnaires pour les quarks

M. Gell-Mann fut amené à essayer quelque chose qui était soit fou, soit très audacieux. Il assigna aux quarks des charges fractionnaires ! Le *u* se vit attribuer la charge $2/3$, le *d* une charge $-1/3$, et le *s* une charge $-1/3$. Le modèle fonctionnait, mais le prix à payer était l'introduction d'un type de particules qui n'avait jamais été observé. De plus, on s'est aperçu que les quarks ont un comportement étonnant : ils ne peuvent pas se déplacer librement, ils forment toujours des états liés dans lesquels ils sont confinés, on ne peut pas les isoler contrairement à toutes les autres particules connues.

De cette constatation, les physiciens ont construit un modèle où les quarks interagissent *via* des particules nommées gluons. La dynamique des gluons a une caractéristique très particulière. J'ai mentionné plus haut que les interactions qui nous sont familières (électromagnétique,



2. LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN représentent de façon imagée et commode les différents termes mathématiques qui entrent dans le calcul de la probabilité d'interaction de deux particules. Ainsi, le terme dominant dans l'interaction électromagnétique de deux électrons e^- correspond à l'échange d'un photon, noté γ [a]. Dans une représentation simplifiée de l'interaction forte d'un proton p avec un neutron n , c'est l'échange d'un pion π^- qui véhicule la force d'attraction entre le proton et le neutron [b] ; cette force assure la cohésion du noyau atomique.

nucléaire et même gravitationnelle) décroissent en intensité à mesure que la distance séparant les objets augmente. La force produite par les gluons a la propriété contraire. Elle s'apparente davantage à l'étirement d'un élastique, où la force de rappel est d'autant plus grande que vous tirez. Bien sûr, vous pouvez étirer un élastique au point de le rompre. Pas les quarks. La force de confinement devient simplement plus intense. Il n'y a pas moyen de s'échapper. Les quarks sont emprisonnés soit par trois pour former des baryons, tels le proton ou le neutron, soit par paires quark-antiquark pour former des mésons, tel le pion.

Pour certains, cela soulève une question : dans quel sens peut-on dire que les quarks « existent » si on ne peut pas les observer individuellement ? Dans les années 1960, le Collisionneur linéaire de Stanford apporta une réponse nette. Ce dispositif de 3,2 kilomètres de long accélérerait des électrons qui percutaient à haute énergie une cible de protons. Les résultats des expériences montrèrent que les électrons heurtaient des objets durs à l'intérieur des protons. Et ces objets avaient la charge des quarks. Il devenait difficile de soutenir que les quarks n'existaient pas.

Je serais négligent si je ne racontais pas aussi ce qui s'est passé depuis cette découverte. Nous savons maintenant qu'il existe six saveurs différentes de quarks : *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* et *top* (notés *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t*). Ils ont tous des charges fractionnaires, et des masses allant d'une minuscule fraction de la masse du proton à près de 200 fois celle-ci.

Mais la situation est plus complexe encore. D'après la mécanique quantique,

■ L'AUTEUR

Jeremy BERNSTEIN est professeur émérite de physique à l'Institut de technologie Stevens dans le New Jersey, aux États-Unis.

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

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Bernstein, *A Palette of Particles*, Harvard University Press, à paraître, 2012.

F. E. Close, *The Infinity Puzzle : Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe*, Basic Books, 2011.

De quoi est fait l'Univers ?, *Dossier Pour la Science* n° 62, janvier-mars 2009.

J. Baggott, *The Quantum Story : A History in 40 Moments*, Oxford University Press, 2009.

J. E. Bernstein, *Quantum Leaps*, Harvard University Press, 2009.

É. Augé *et al.*, *Voyage au cœur de la matière*, Belin, 2002.

il ne peut y avoir deux quarks identiques et dans le même état dans une même particule. C'est une conséquence de ce que l'on nomme le principe d'exclusion de Pauli. Le proton est une combinaison uud de quarks. Cela ne pose pas de problème, parce que les deux u peuvent être dans des états de spin différents. Mais en 1964, une particule nommée Ω^- fut découverte au Laboratoire américain de Brookhaven. Elle avait été prédite comme le membre ultime d'un décuplet de la voie octuple. Or sa composition en quarks est sss , ce que le principe d'exclusion de Pauli n'autorisait pas.

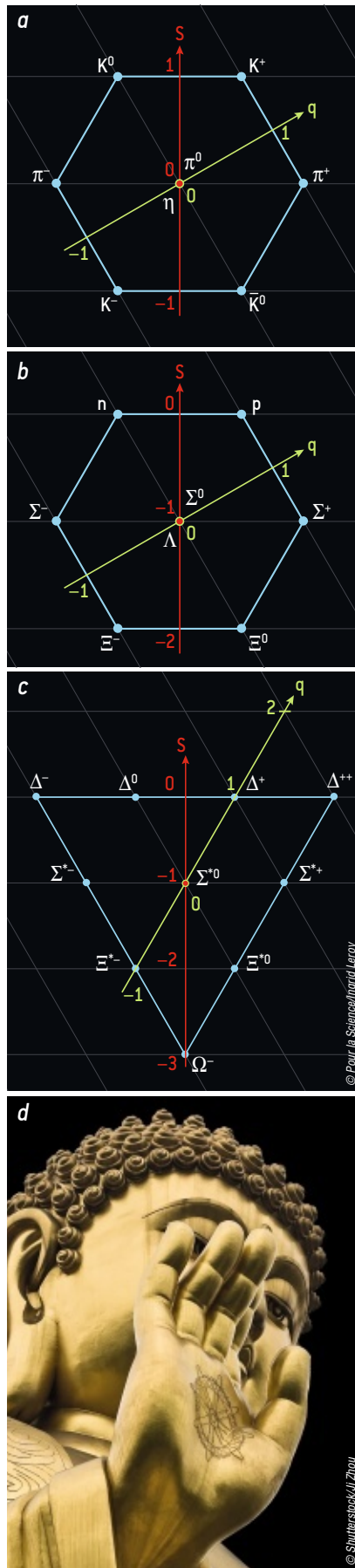
Pour résoudre cette difficulté, les théoriciens supposèrent que les quarks présentent une propriété quantique supplémentaire, la « couleur ». Les quarks peuvent être de trois couleurs différentes. Il ne s'agit pas de couleurs au sens usuel, mais d'un nouveau type de charge. Ainsi, lorsqu'on écrit que le Ω^- est constitué de trois quarks s , on suppose qu'ils ont chacun une couleur différente. Seules les particules élémentaires portant une charge de couleur sont sensibles à l'interaction forte, de même que seules les particules ayant une charge électrique sont sensibles à l'interaction électromagnétique.

Briser des symétries

Il était reconnu dès le départ que la symétrie utilisée dans la voie octuple n'était qu'une symétrie approchée. Si la symétrie était exacte, toutes les particules d'un même multiplet auraient eu la même masse. Les pions sont placés dans un octet qui inclut également les mésons K (ou kaons) dont la masse est trois fois supérieure à celle du pion. De fait, quand on examine les propriétés de ces particules, il est difficile de les rapprocher et de voir quelle symétrie les unit.

La symétrie sous-jacente à la voie octuple est donc brisée. Il existe plusieurs façons de briser une symétrie. La plus

3. LA « VOIE OCTUPLE » de Murray Gell-Mann s'appuie sur la théorie des groupes de symétrie pour organiser les particules de la famille des hadrons. Trois exemples de multiplets sont présentés, des mésons (duos quark-antiquark) [a] et des baryons (trios de quarks) [b et c]. L'axe rouge indique la charge d'étrangeté de la particule (un quark s a une charge d'étrangeté égale à -1). L'axe vert indique la charge électrique. Le nom du modèle de Gell-Mann s'inspire de la philosophie bouddhiste, dont le symbole de la voie octuple est gravé dans la paume de la statue [d].



simple est de déranger l'ordre du système symétrique avec une perturbation. Ce type de brisure fut étudié par le mathématicien allemand Hermann Weyl et le physicien hongrois Eugene Wigner, qui l'appliqua à l'étude des spectres atomiques. Les électrons qui entourent le noyau des atomes occupent des « orbites » quantifiées. Si l'atome n'est pas perturbé, les électrons s'installent sur les orbites de plus basse énergie, les « états fondamentaux ». Mais si un choc électrique excite l'atome, les électrons sont propulsés sur des orbites plus énergétiques. Puis ils retournent à l'état fondamental en émettant un rayonnement.

Cette émission se traduit par une raie dans le spectre atomique caractéristique de l'élément et permet de l'identifier lorsqu'on étudie la lumière d'une étoile, par exemple. Ces raies reflètent la symétrie (de rotation notamment) du système atomique qui produit ces niveaux énergétiques. Mais en plongeant les atomes dans un champ magnétique, on brise cette symétrie. Ce qui était une raie spectrale unique devient un ensemble de plusieurs raies (il s'agit de l'effet Zeeman). Le nombre et l'intensité de ces raies peuvent être déterminés d'après la symétrie qui a été brisée.

Ce type de brisure de symétrie de Wigner-Weyl intervient dans la voie octuple. On ajoute une perturbation qui brise la symétrie, si bien que les masses des particules du multiplet se différencient. On obtient ainsi des relations entre les masses, vérifiées empiriquement, ce qui renforce la confiance dans le mécanisme de brisure.

En 1961, le physicien américain d'origine japonaise Yoichiro Nambu et son étudiant Giovanni Jona-Lasinio publièrent deux articles sur un type complètement différent de brisure de symétrie, la brisure spontanée de symétrie. Supposez que vous posiez verticalement une tige rectiligne. Vu du dessus, le système est parfaitement symétrique, aucune direction ne se distingue. L'équilibre est cependant instable et la tige bascule. La probabilité de tomber est la même dans toutes les directions. Une fois la tige au sol, la symétrie est perdue. Autrement dit, les équations peuvent présenter des symétries sans que les solutions ne les respectent. Ce type de brisure de symétrie est dit spontané, pour le distinguer du type Wigner-Weyl où l'on ajoute à l'équation présentant la symétrie un terme perturbateur non symétrique.

L'influence de Y. Nambu sur la physique a été notable. Il a appliqué ses idées aux aimants, aux cristaux et aux supraconducteurs ainsi qu'à la théorie des particules élémentaires. Dans le cadre de cette dernière, la brisure spontanée de symétrie fait apparaître une particule inattendue. Il s'agit d'un boson. Ce terme vient du nom du physicien indien Satyendra Nath Bose, qui a étudié le comportement statistique de ces particules qui ne suivent pas le principe d'exclusion de Pauli. Les photons, les pions et les kaons sont des exemples de bosons. L'autre classe de particules, qui inclut l'électron, le proton et le neutrino, constitue les fermions (en hommage à Fermi).

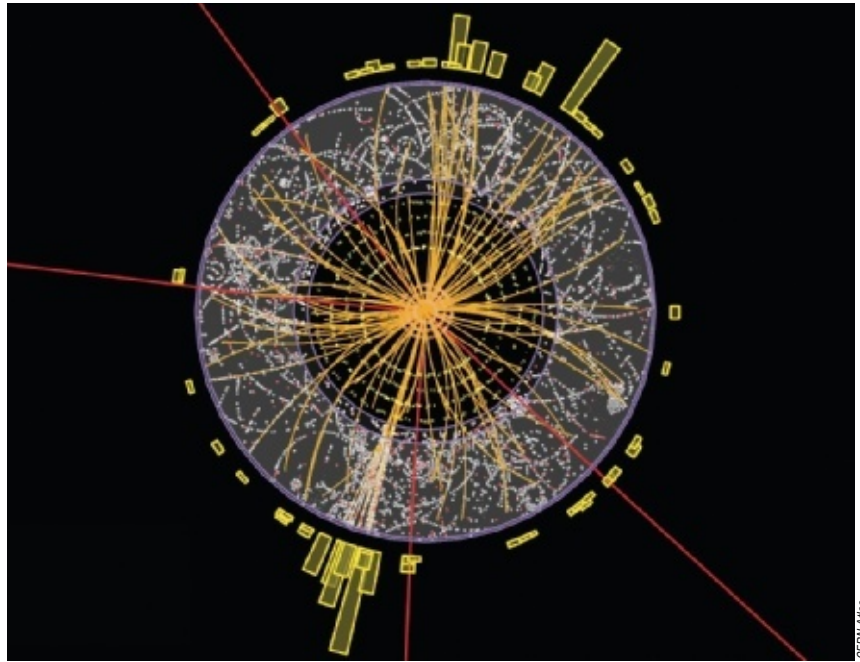
La particule du modèle de Y. Nambu est un boson de masse nulle. Mais on ne connaissait aucun boson de masse nulle, à part le photon. Au départ, on pensait que cela pourrait être un artefact du modèle ; mais, en 1961, le physicien d'origine britannique Jeffrey Goldstone trouva un autre modèle avec de telles particules, maintenant nommées bosons de Nambu-Goldstone.

En 1964, les physiciens belges Robert Brout et François Englert, d'une part, et le Britannique Peter Higgs, d'autre part, ont mis en évidence l'importance de la brisure spontanée de symétrie en physique des particules. P. Higgs donna l'exemple d'un modèle avec des bosons et un « photon » sans masse qui interagissent. Cette théorie présentait une symétrie apparente qui se brise spontanément. On montre alors que, dans ce modèle, le photon, dépourvu de masse, en acquiert une, et la théorie s'enrichit d'un boson supplémentaire de masse non nulle, le boson de Higgs.

La clef du modèle : le boson de Higgs

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs a eu un rôle crucial dans la construction du modèle standard de la physique des particules, qui décrit les trois interactions fondamentales autres que la gravitation : l'interaction forte, qui tient les quarks confinés par l'échange de gluons, l'interaction électromagnétique, qui s'exerce par l'échange de photons, et l'interaction faible, responsable de réactions telles que la désintégration bêta.

Pour comprendre l'importance du mécanisme de Englert-Brout-Higgs, il faut se pencher sur les travaux qui ont conduit à la description de l'interaction faible.



4. RECONSTITUTION SUR ORDINATEUR d'une collision proton-proton au sein du détecteur ATLAS, au CERN. Dans ce choc, de nombreuses particules sont produites. Certaines ont une durée de vie trop courte pour être détectées par les instruments. Pour d'autres, il est possible de déterminer leur trajectoire.

En 1933, Fermi avait modélisé l'interaction faible par une force de portée nulle, ce qui signifie que les particules impliquées devaient être en contact pour interagir. La théorie expliquait beaucoup de choses, mais son comportement à haute énergie n'était pas correct. Les physiciens supposèrent alors que l'interaction faible devait se faire par l'échange de bosons très lourds.

Vers 1967, les travaux de plusieurs théoriciens, en particulier les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg et le Pakistanais Abdus Salam, ont convergé vers une théorie décrivant de façon unifiée l'interaction faible et la force électromagnétique. Dans cette théorie dite électrofaible, l'interaction faible est véhiculée par deux particules chargées nommées bosons W (pour *weak*, faible) et une neutre, le boson Z.

Cependant, il n'était pas possible d'attribuer explicitement une masse aux bosons W et Z sans violer certains principes de symétrie de la théorie. En 1967, S. Weinberg et, indépendamment, A. Salam ont su appliquer le mécanisme de Englert-Brout-Higgs à la théorie électrofaible. On part d'une situation symétrique où le photon et les bosons de l'interaction faible n'ont pas de masse. Par brisure spontanée de la symétrie, les bosons W et Z acquièrent une masse, mais pas le photon. Le boson de Higgs, issu de la brisure de symétrie, acquiert aussi une masse. La théorie a été depuis

confirmée, en particulier avec la mise en évidence en 1983, au CERN, des bosons W et Z avec une masse d'environ 80 et 91 fois celle du proton. Malgré ce succès, le boson de Higgs manquait à l'appel.

La recherche de cette particule a nécessité la construction de collisionneurs gigantesques. Trois accélérateurs ont participé à cette traque, le LEP (*Large Electron-Positron collider*), puis le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons), au CERN, et le *Tevatron* au Fermilab, près de Chicago. Le LEP, en service de 1989 à 2000, n'a pas détecté le boson de Higgs, mais a fourni une limite inférieure à sa masse, de l'ordre de 114 gigaélectronvolts. Le *Tevatron*, qui a fonctionné jusqu'en septembre 2011, a amélioré les contraintes sur la masse et a détecté un début de signal qui a été confirmé au LHC. Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du LHC, inauguré en 2009, ont annoncé la découverte d'un nouveau boson avec une masse d'environ 125 gigaélectronvolts. Cette particule est très probablement le boson de Higgs.

Cinquante ans auront ainsi été nécessaires pour confirmer pleinement la théorie électrofaible. Mais les physiciens ne s'arrêtent pas en si bon chemin pour comprendre les interactions fondamentales. De nouvelles questions se posent, de nouvelles expériences sont à imaginer pour de nouvelles découvertes. ■

Le boson de Higgs, et après ?

John Ellis

La découverte d'une nouvelle particule a été annoncée en juillet 2012 au CERN. Il s'agit probablement du boson de Higgs. Il reste aux physiciens non seulement à le vérifier, mais aussi à s'attaquer aux nombreuses questions associées à cette particule.

La découverte au CERN d'une nouvelle particule, début juillet, est un événement important pour les physiciens des particules. Cette particule est-elle le « boson de Higgs », dont l'existence a été postulée dans les années 1960 ? Les physiciens doivent en déterminer les propriétés pour s'assurer qu'elles correspondent bien à celles attendues du boson de Higgs. Si c'est bien le cas, cette découverte marquera le plein succès du modèle standard de la physique des particules. Mais elle ne sera pas un point final. Le boson de Higgs soulève en effet de nombreuses questions théoriques qui soulignent les limites du modèle standard et la nécessité de rechercher des signes d'une théorie plus fondamentale.

Le modèle standard de la physique des particules décrit toute la matière visible de l'Univers à partir d'un nombre limité de particules élémentaires, qui sont des fermions (des particules de spin – ou moment cinétique intrinsèque – demi-entier, dans les unités atomiques) : les quarks qui forment les protons et les neutrons des noyaux atomiques, les élec-

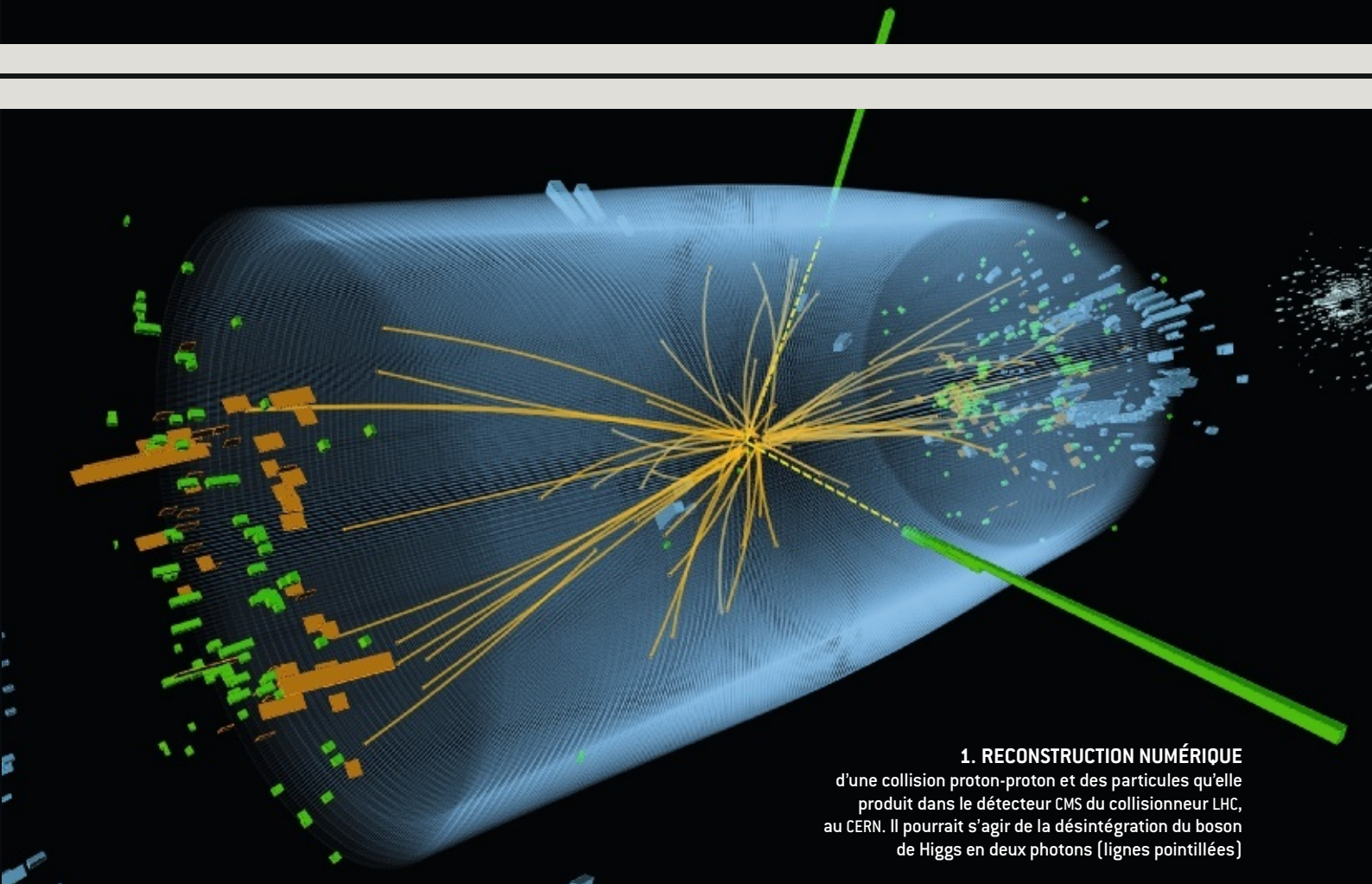
trons et ses deux versions plus lourdes (le muon et le tau), ainsi que trois neutrinos. Mise à part la gravitation, non prise en compte par le modèle standard, on distingue trois interactions fondamentales entre ces particules : la force électromagnétique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux, et l'interaction faible, responsable notamment de la radioactivité bêta. Les équations les plus simples du modèle standard ne font pas de réelle distinction entre les particules de matière, ce qui suggère qu'elles devraient toutes être de masse nulle. Or aucune ne vérifie cette propriété, toutes ont une masse. Cela n'est pas sans importance : les atomes ne pourraient pas exister si les électrons avaient une masse nulle, car ils pourraient s'en échapper à la vitesse de la lumière.

Le modèle standard contient aussi des bosons (particules de spin entier) qui correspondent aux particules véhiculant les interactions fondamentales. Le plus connu est le photon, dont l'échange entre deux particules chargées est responsable de la force électromagnétique. Comme le photon est de masse nulle, l'interaction élec-

tromagnétique a une portée infinie. Ce n'est pas le cas de l'interaction faible, qui a une portée limitée, de l'ordre de 10^{-18} mètre. Cette courte portée est liée au fait que les trois particules véhiculant cette interaction, les bosons W^+ , W^- et Z , ont une masse élevée, d'environ 80 et 91 gigaélectronvolts (GeV), soit une masse équivalente à celle de noyaux de taille moyenne. Les bosons W et Z ont une masse si importante qu'il a fallu attendre 1983 pour les découvrir au CERN, alors que le photon est connu depuis les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique, en 1905.

À l'origine des masses

Comment expliquer que les bosons W et Z ont une masse élevée tandis que le photon est de masse nulle ? Et d'où vient la masse des particules de matière ? En attribuant explicitement et de façon *ad hoc* une masse aux particules dans les équations, on obtenait une théorie incohérente et des prédictions absurdes. Vers 1964, les physiciens belges François Englert et Robert



1. RECONSTRUCTION NUMÉRIQUE

d'une collision proton-proton et des particules qu'elle produit dans le détecteur CMS du collisionneur LHC, au CERN. Il pourrait s'agir de la désintégration du boson de Higgs en deux photons (lignes pointillées)

Brout, et, indépendamment, le physicien britannique Peter Higgs proposèrent un mécanisme qui évitait les incohérences. Cette solution est celle adoptée dans le modèle standard.

Selon le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, la propriété que nous mesurons comme étant la « masse » d'une particule est le résultat d'une interaction permanente de la particule avec un champ présent partout dans l'Univers. Certaines particules, telles le W et le Z, interagissent plus intensément avec ce champ universel, ce qui leur confère une masse élevée, tandis que d'autres, comme le photon, n'interagissent pas du tout avec le champ et gardent donc une masse nulle (voir l'encadré page 33).

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, dans sa version élémentaire, est le modèle théorique le plus simple capable de rendre compte de la différence de masse entre le photon et les bosons W et Z, ainsi que des masses des autres particules. Il existe cependant d'autres théories qui tentent de résoudre le problème de la masse. Par exemple, l'Univers pourrait

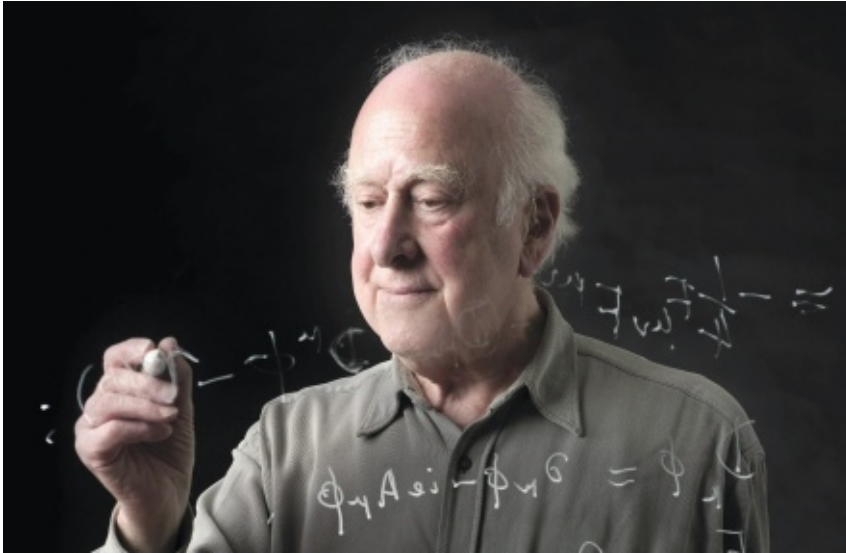
contenir des dimensions spatiales supplémentaires, compactes et imperceptibles à notre échelle; les particules n'auraient pas toutes le même comportement dans ces dimensions, ce qui leur conférerait des masses différentes.

L'existence du champ de Englert-Brout-Higgs sera prouvée si l'on découvre la particule associée à ce champ (dans la théorie quantique, toute particule élémentaire est un quantum d'un certain champ). Sa présence dans la théorie fut soulignée en 1964 par P. Higgs, d'où son nom de boson de Higgs. Dans la théorie la plus simple, celle du modèle standard, il n'y a qu'un seul boson de Higgs; mais d'autres théories n'y font pas du tout appel ou, au contraire, en nécessitent plusieurs. Seule l'expérience permettra de départager ces différentes pistes.

Quelques articles publiés au début des années 1970 examinaient la possibilité de produire et détecter le boson de Higgs dans un collisionneur de particules. La première étude systématique a été proposée par Mary Gaillard, Dimitri Nanopoulos et moi en 1975. Nous discutons

L'ESSENTIEL

- La nouvelle particule observée au CERN est une particule de spin entier et sa masse est d'environ 125 GeV. Il faut s'assurer qu'elle a bien les propriétés du boson de Higgs.
- Le boson de Higgs est une particule de spin nul, ses couplages aux autres particules sont proportionnels à leur masse et il peut se coupler à lui-même.
- L'étude de la nouvelle particule donnera peut-être des indices sur la physique au-delà du modèle standard et sur la nature de la matière noire.



CERN

2. LE PHYSICIEN BRITANNIQUE PETER HIGGS a développé, en même temps que les Belges Robert Brout et François Englert, un mécanisme qui permet de donner une masse aux particules. P. Higgs est le premier à avoir prévu l'existence d'une particule associée à ce mécanisme, et cette particule porte désormais son nom.

■ L'AUTEUR



John ELLIS est professeur de physique théorique au King's College de Londres

et chercheur au CERN à Genève.

■ BIBLIOGRAPHIE

The ATLAS collaboration, **Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC**, soumis à *Physics Letters B*. <http://arxiv.org/abs/1207.7214>

The CMS collaboration, **Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC**, soumis à *Physics Letters B*. <http://arxiv.org/abs/1207.7235>

C. Quigg, **Le Higgs et autres quêtes du LHC**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

4 juillet 2012 la découverte d'une particule d'une masse d'environ 125 GeV, qui pourrait être le boson de Higgs.

Sa durée de vie étant trop courte, le boson de Higgs ne peut pas être décelé directement par les détecteurs. Il se désintègre rapidement en d'autres particules qui, elles, peuvent être détectées par les appareils de mesure : en particulier, la désintégration en deux photons, en paires de bosons Z ou W, ou encore en paires quark-antiquark *b*. Les expériences ATLAS et CMS ont recueilli des signaux forts de désintégrations d'une nouvelle particule en photons et en bosons Z. Par ailleurs, les détecteurs DØ et CDF du *Tevatron* ont obtenu quelques signaux venant de la désintégration en paires quark-antiquark *b*.

Ces données suffisent pour affirmer aujourd'hui qu'une particule différente de celles connues a été découverte. L'étude de son spin indique qu'elle prend une valeur entière ; il s'agit donc d'un boson. Cependant, nous savons déjà que le spin de cette particule diffère de celui du photon et du boson W ou Z, qui ont un spin égal à un. Son spin vaut soit zéro, comme le prédit la théorie de Englert-Brout-Higgs, soit deux. Vérifier que le spin est bien nul fait partie des priorités. Pour ce faire, il faut par exemple mesurer la distribution angulaire des photons et des autres particules produites par la désintégration de la nouvelle particule. Ce type d'études nécessite plus de données, mais devrait être possible dès la fin de l'année 2012.

Sonder les propriétés du boson de Higgs

Une autre propriété du boson de Higgs qu'il faudra étudier est son couplage aux autres particules, c'est-à-dire l'intensité de l'interaction directe du boson de Higgs avec chacune d'elles. La théorie indique que, parce qu'il confère leur masse aux particules, son couplage avec une particule dotée d'une masse doit être proportionnel à cette dernière. Certaines informations sur les couplages peuvent être obtenues directement par l'étude des canaux de désintégration en Z, en W, en paires de quarks *b* ou en paires de taus. D'autres sont obtenues indirectement à partir de la désintégration en photons : ce processus fait apparaître des quarks *t* intermédiaires couplés au boson de Higgs, d'une part, et aux photons, d'autre part. Dans un article récent, j'ai montré avec

Tevong You, de l'Imperial College à Londres, que les couplages de la nouvelle particule ressemblent approximativement à ceux du boson de Higgs. Des données plus nombreuses permettront de vérifier leur dépendance vis-à-vis des masses avec une précision de dix pour cent.

Une troisième propriété clef est le couplage du boson de Higgs avec lui-même. Dans le cadre du modèle standard, le boson de Higgs a des couplages trilineaire et quadrilineaire (correspondant, dans les diagrammes, à des interactions entre trois ou quatre bosons de Higgs connectés en un point). La mesure du couplage quadrilineaire semble très difficile. En revanche, si le LHC produit assez de collisions, on observera peut-être des paires de bosons de Higgs issues d'un processus où la particule intermédiaire est un boson de Higgs, auquel cas le couplage trilineaire pourra être estimé.

En même temps que ces mesures des propriétés de la nouvelle particule seront réalisées, le modèle le plus simple du mécanisme de Englert-Brout-Higgs sera comparé à des modèles alternatifs, et les données expérimentales permettront d'éliminer certains scénarios.

Il y a de bonnes raisons de penser que le modèle le plus simple, où il n'y a qu'un seul boson de Higgs, ne peut expliquer complètement la question de l'origine de la masse des particules. Dans le cadre du modèle standard, si la masse du boson de Higgs est réellement inférieure à 127 GeV, le champ de Higgs ne serait pas aujourd'hui dans son état de plus basse énergie. Il serait dans un état instable et pourrait basculer à tout instant vers un niveau d'énergie plus bas (voir la figure 3). Les lois de la physique changeraient brusquement et l'Univers tel que nous le connaissons cesserait d'exister. Certes, l'Univers pourrait subsister dans cet état instable durant un temps très supérieur à l'âge actuel de l'Univers. Cette instabilité serait cependant le signe d'une théorie incomplète.

Une autre difficulté est celle de la masse du boson de Higgs. Dans le modèle standard, c'est un paramètre libre, que nous pourrions fixer à 125 GeV (si la particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs). Cependant, il faut prendre en compte des corrections dues à des processus quantiques qui, mathématiquement, rendent cette masse infinie. Il est possible d'absorber ces corrections infinies en

imposant *in fine* la valeur expérimentale de la masse, mais cela ne peut se faire qu'au prix de réglages très fins des paramètres du modèle standard. Une alternative évitant ce genre d'ajustements, qui paraissent artificiels, serait préférable.

Une façon de contourner ce problème de la masse du boson de Higgs est de supposer qu'il ne s'agit pas d'une particule élémentaire, mais d'un objet composite, ayant des constituants internes – de la même façon que le proton est composé

de trois quarks ou que le méson π est composé d'un quark et d'un antiquark. Dans les théories de la supraconductivité et de l'interaction forte, des brisures spontanées de symétrie analogues à celle en jeu dans le mécanisme de Englert-Brout-Higgs naissent de champs composites, et de nombreux théoriciens se disent que cela pourrait être le cas dans le modèle standard. Si aucun scénario complet et satisfaisant n'a pu être construit dans ce cadre, il existe des modèles partiels permettant

DES PARTICULES DE MASSES DIFFÉRENTES

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs confère une masse non nulle aux bosons W et Z et à toutes les particules du modèle standard. Les particules n'ont pas toutes la même masse, car elles se couplent différemment au champ de Englert-Brout-Higgs. Plus une particule interagit avec ce champ, plus son inertie est grande, ce qui revient à dire que sa masse est élevée. Ce mécanisme peut être comparé à la résistance au mouvement que subit une personne qui traverse un champ de neige.



Une skieuse aux skis bien frottés glisse vite sur la neige, comme si sa masse était très faible, à l'image du photon qui n'interagit pas avec le champ de Englert-Brout-Higgs.



Avec des raquettes, la progression est plus lente. Cette situation illustre celle d'une particule qui interagit légèrement avec le champ de Englert-Brout-Higgs, à l'instar de l'électron.



Un randonneur avec ses chaussures s'enfonce dans la neige. Il interagit beaucoup avec la neige et progresse alors lentement, comme s'il était très lourd. Cela illustre le cas des bosons W et Z, qui se couplent fortement au champ de Englert-Brout-Higgs.

Bruno Vacaro

La découverte du boson de Higgs

L'annonce de la découverte d'une nouvelle particule, le 4 juillet 2012 au CERN, est l'épilogue d'un processus complexe. Pour comprendre comment les physiciens des particules ont mis en évidence cette particule, qui semble être le boson de Higgs prévu par les théoriciens, revenons sur les différentes étapes de ce projet.

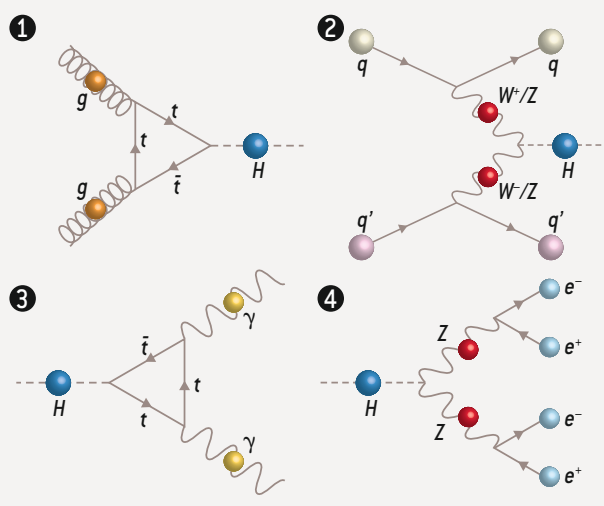
Il faut, avant tout, produire cette particule dans un environnement contrôlé : un collisionneur de particules. Plus la particule recherchée a une masse importante, plus l'énergie de la collision doit être élevée. Le boson de Higgs peut être produit par différents processus, ou modes : la fusion de deux gluons (les bosons véhiculant l'interaction forte), ou la fusion de deux bosons W^+ et W^- ou deux bosons Z (véhiculant l'interaction faible) (voir les diagrammes ① et ②).

Comme la théorie ne donne pas précisément la masse du boson de Higgs, il est nécessaire de fournir beaucoup d'énergie pour garantir sa production. Le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) fonctionne à une énergie de huit téraélectronvolts par collision proton-proton. La totalité de l'énergie n'entre pas dans la réaction de production du boson de Higgs, car seul un élément de chaque proton (un quark ou un gluon) interagit, et il ne transporte qu'une fraction de l'énergie totale. La production d'un boson de Higgs lors de ces collisions est un événement rare : en moyenne, une fois tous les 65 milliards de collisions. Le LHC produit 20 millions de collisions par seconde, ce qui permet de créer suffi-

samment de bosons de Higgs, ainsi que d'autres processus également étudiés. La quantité de données étant gigantesque, un système rapide et automatisé utilise les informations brutes des détecteurs pour effectuer une présélection des événements intéressants, réduisant leur nombre à environ 300 par seconde.

Le boson de Higgs, particule instable, a une durée de vie si courte qu'il n'est pas directement détectable. Il se désintègre en d'autres particules pour produire, par exemple, deux photons ou quatre leptons (voir les diagrammes ③ et ④). Le rôle des détecteurs est d'enregistrer les caractéristiques des particules produites.

Un détecteur tel que celui de l'expérience ATLAS est constitué de plusieurs couches concentriques. La couche la plus proche de la collision, baignant dans un fort champ magnétique de deux teslas, sert à mesurer les points de passage des particules chargées afin de reconstruire leur trajectoire, ce qui permet de calculer leur impulsion et leur charge électrique. Ensuite, des calorimètres stoppent la plupart des particules et mesurent leur énergie. Le premier calorimètre est dédié à la mesure de l'énergie des électrons et des photons, le deuxième est spécifique aux hadrons. Les muons, qui interagissent peu, atteignent les détecteurs les plus externes. Les neutrinos, qui traversent l'ensemble des détecteurs sans interagir, se traduisent par un déficit dans le bilan d'énergie. En combinant les informations des différents détecteurs, on peut ainsi reconstituer tous les produits de la collision.



Le boson de Higgs (H) peut être produit par l'un ou l'autre des deux processus suivants : la fusion de gluons (g) avec une boucle de quarks t virtuelle ① et la fusion de deux bosons W^+ et W^- (ou deux bosons Z) émis par des quarks ②. Il peut se désintégrer, par exemple, en deux photons (γ) ③ ou en deux paires de leptons, ici deux paires électron-positron ④.

L'étude des désintégrations du boson de Higgs, en deux photons par exemple, est complexe, car d'autres processus bien connus produisent les mêmes états finals et dans des quantités bien plus importantes ; on parle de bruit de fond, par opposition au signal (les processus où intervient le boson de Higgs).

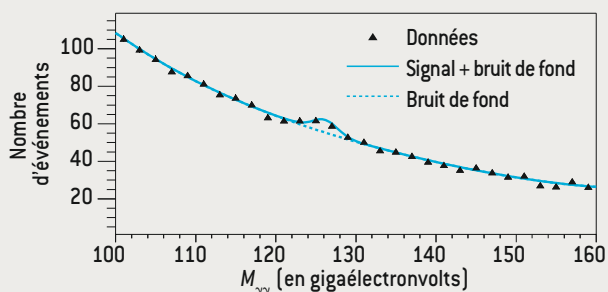
Une analyse fine des propriétés des particules produites permet de séparer le signal du bruit de fond. Il faut d'abord modéliser les collisions avec les processus du signal et ceux du bruit de fond, ainsi que les interactions des particules avec le détecteur. L'étude de ces simulations permet de mettre en évidence les critères de sélection qui serviront à isoler le signal du bruit de fond. Pour s'assurer que les simulations reproduisent bien ce qui se passe dans le détecteur, une étape de comparaison entre les données et la simulation est effectuée sur des processus bien connus, où le boson de Higgs n'intervient pas. Ce test permet de vérifier que les effets du détecteur sont bien simulés et que les processus physiques sont bien compris. Cette étape peut prendre des semaines, voire des années.

On peut ensuite étudier les processus où le signal correspondant au boson de Higgs pourrait se manifester.

C'est le cas, par exemple, de l'étude des signaux à deux photons : leurs caractéristiques permettent de calculer la masse de la particule qui leur a donné naissance. On obtient, en fonction de cette masse, une distribution statistique des événements, où le bruit de fond est reconnaissable grâce à sa forme d'exponentielle décroissante, alors que le signal apparaît comme une bosse au-dessus du bruit de fond (voir la figure en bas et à gauche).

À cause du faible nombre d'événements, nos yeux ne décèlent pas toujours un signal. On utilise des méthodes statistiques, dont l'une des indicateurs est la probabilité que le bruit de fond produise un excès ressemblant au signal. Si cette probabilité est inférieure à une chance sur trois millions (correspondant à cinq écarts-types d'une distribution gaussienne), on peut considérer qu'on a découvert un signal. C'est ce que les équipes du CERN ont obtenu. Cette particule, avec une masse de l'ordre de 125 gigaélectronvolts, ressemble au boson de Higgs recherché. Comme l'explique John Ellis, un long travail reste à faire pour mesurer les propriétés de cette nouvelle particule.

Fabien Tarrade
ATLAS – CERN
Université de Carleton, Canada



La distribution des événements obtenue par l'expérience ATLAS en fonction de la masse $M_{\gamma\gamma}$, calculée *a posteriori* et dont provient la paire de photons détectés, a une forme caractéristique. Le bruit de fond décroît de façon exponentielle, tandis que la bosse, centrée sur environ 125 gigaélectronvolts, correspondrait au signal du boson de Higgs.

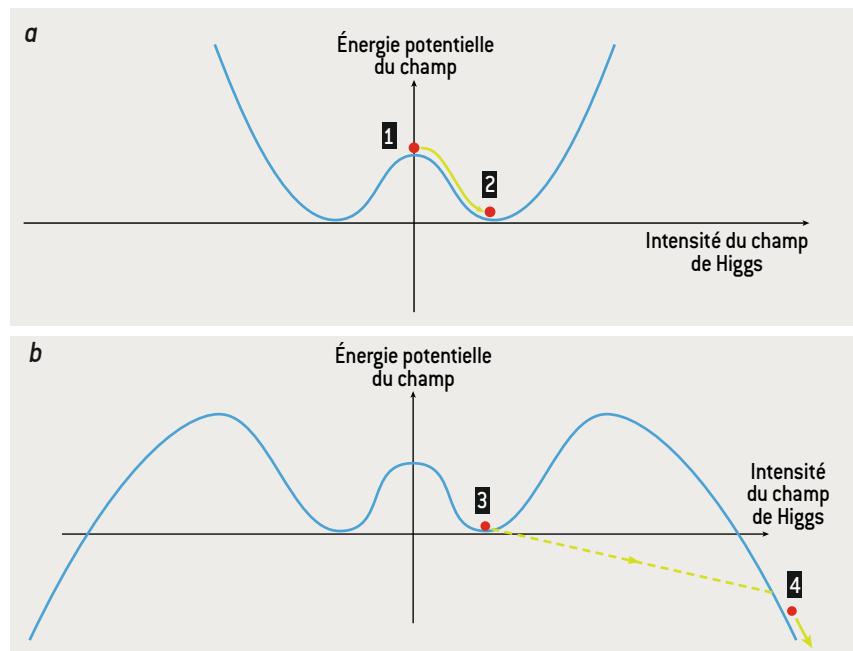
de calculer les couplages du boson de Higgs aux autres particules. Comme ces couplages diffèrent de ceux du modèle standard, les données du LHC devraient mettre à l'épreuve ces scénarios et en exclure certains.

Si, au contraire, le boson de Higgs est bien une particule élémentaire, de nombreux théoriciens pensent qu'il devra être intégré à un cadre plus vaste que le modèle standard, telle la supersymétrie. Dans cette théorie, chaque particule du modèle standard aurait un partenaire ayant des propriétés semblables, à l'exception du spin. Les corrections sur la masse du boson de Higgs dues aux particules supersymétriques compenseraient alors celles des particules du modèle standard. La masse du boson de Higgs ne deviendrait pas infinie. Qui plus est, dans l'hypothèse de la supersymétrie, l'état actuel de l'Univers serait stable et la masse du boson de Higgs serait inférieure à 130 GeV, comme observé.

Un ou plusieurs bosons de Higgs ?

En fait, la théorie de la supersymétrie prévoit non pas un, mais cinq bosons de Higgs, dont le moins lourd aurait un comportement légèrement différent de celui du boson de Higgs du modèle standard. La chasse est donc ouverte pour trouver ces autres bosons de Higgs et mesurer des signes caractéristiques de la supersymétrie dans la production et la désintégration du boson qui a été découvert.

En plus d'étudier de près la nouvelle particule et chercher d'autres bosons de Higgs, les physiciens du LHC traquent des signes directs de la production de particules supersymétriques. Dans de nombreux modèles, la particule supersymétrique la plus légère est électriquement neutre, interagit faiblement avec les autres particules et est stable. Elle aurait été produite dans les premiers instants de l'Univers et serait présente en grandes quantités aujourd'hui sous la forme de matière noire. L'existence de cette dernière a été postulée par les astrophysiciens et les cosmologistes pour expliquer de nombreuses observations. Au LHC, les particules supersymétriques seraient détectées sous la forme d'événements dans lesquels une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement de la collision serait manquante, car emportée par les



3. LE MÉCANISME DE BRISURE DE SYMÉTRIE proposé par F. Englert, R. Brout et P. Higgs suppose que les équations de la théorie vérifient une certaine symétrie, mais pas les solutions des équations. On peut représenter de façon simplifiée le potentiel supposé du champ de Higgs en fonction de l'intensité du champ (*a*, courbe bleue). Une intensité nulle du champ [1] correspond à une solution symétrique, mais pas à l'état de plus basse énergie : cette solution est donc instable. On a alors une transition spontanée vers une position stable [2 par exemple], mais qui n'est plus symétrique. Le champ a alors une intensité non nulle, ce qui est à l'origine de la masse des particules. Pour un boson de Higgs de masse inférieure à 127 GeV, si on inclut des corrections quantiques, l'équation du potentiel est modifiée (*b*). La position [3] n'est plus celle de plus basse énergie. Par effet tunnel, le champ pourrait passer en position [4] et son intensité continuer à croître sans limite, ce qui modifierait profondément la physique de l'Univers.

particules de matière noire. De tels signaux n'ont pas encore été observés assez fréquemment pour être attribués à des processus en dehors du modèle standard. Les chances d'observer de tels événements augmenteront à partir de 2015, quand le LHC fonctionnera avec une énergie de collision plus importante (14 téraélectronvolts au lieu de 8 actuellement).

Le boson de Higgs pourrait nous éclairer sur d'autres questions encore en physique des particules et en cosmologie. Dans le modèle du Big Bang, matière et antimatière auraient été produites dans des proportions égales, mais se seraient annihilées en produisant des photons. Si ce scénario est correct, toute la matière et l'antimatière devraient avoir disparu. Dans ce cas, pourquoi l'Univers contient-il de la matière et pas du tout d'antimatière ? Cela pourrait s'expliquer par une asymétrie de comportement entre la matière et l'antimatière, qui serait responsable d'un léger excès de matière et qui aurait donc survécu à l'annihilation. Le modèle standard présente une telle asymétrie, mais elle

est insuffisante. La supersymétrie et divers modèles contiennent d'autres sources d'asymétrie susceptibles d'expliquer la disparition de l'antimatière. Ces asymétries supplémentaires pourraient apparaître directement ou indirectement dans les propriétés du boson de Higgs.

Si la nouvelle particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs, elle complètera notre description de la matière visible de l'Univers et des processus qui ont régi le Big Bang après le premier milliardième de seconde. Comme nous l'avons vu, le boson de Higgs pourrait être lié à la matière noire et avoir joué un rôle dans la production de la matière dans l'Univers. C'est cependant une particule très différente de toutes celles que nous connaissons, et elle pose presque autant de questions qu'elle n'apporte de réponses. Son existence même et la valeur de sa masse suggèrent que le modèle standard ne peut être le fin mot de l'histoire, et que le LHC pourrait nous révéler des pans d'une nouvelle physique. La quête se poursuit. ■

LES SALPES

reines du plancton marin

Jean-Claude Braconnot

Les salpes, une des formes les plus abondantes de plancton animal, filtrent l'eau de mer à une vitesse remarquable. Cette propriété leur confère un rôle important dans le fonctionnement du milieu marin.

Avila Beach, comté de San Luis Obispo, Californie. Le 26 avril 2012, la centrale nucléaire locale, Diablo Canyon, au bord de l'océan Pacifique, est contrainte de stopper d'urgence son fonctionnement. Le circuit de refroidissement de ses deux réacteurs est alimenté à l'eau de mer; or, depuis deux jours, des vents du Sud charrient vers l'entrée du circuit... des salpes. Ces organismes gélatineux en forme de tonneau, longs de un à une trentaine de centimètres selon les espèces, se sont agglutinés en si grand nombre sur le filtre du circuit qu'ils l'ont bouché pendant plusieurs jours.

Les salpes, deuxième forme la plus abondante de zooplancton – le plancton animal – après les copépodes (de petits crustacés), sont de vieux ennemis des pêcheurs marins. Le 13 avril 1979, notamment, entre Saint-Tropez et la frontière italienne, la pêche sur la côte méditerranéenne fut catastrophique suite à une invasion de l'espèce *Salpa fusiformis*: «Il y avait en suspension, et en profondeur, des millions de "choses" [qui] sem-

blaient respirer», rapporta un pêcheur dans le quotidien *Nice-matin*. Cette espèce est aussi bien connue des baleiniers industriels chassant dans l'Antarctique: là où les salpes abondent, il n'y a aucune chance de capturer des baleines à fanons, car celles-ci n'y trouvent plus de crevettes du krill, leur nourriture, et migrent à leur recherche. Les salpes, comme le krill, se nourrissent de phytoplancton, le plancton végétal, mais se reproduisent plus vite, si bien qu'elles l'emportent sur leur compétiteur...

La place de ces animaux gélatineux, très peu consommés, dans l'écosystème marin, n'a pas toujours été comprise. On a longtemps pensé qu'ils représentaient une sorte d'impasse dans la chaîne alimentaire, où ils ne retombaient que lors de leur décomposition. Aujourd'hui, grâce à l'étude de leur cycle de vie et de l'impact de ce cycle sur les quantités de carbone organique disponible dans les fonds marins, on comprend mieux leur rôle fondamental dans le milieu. Gros consommateurs de plancton végétal, sans



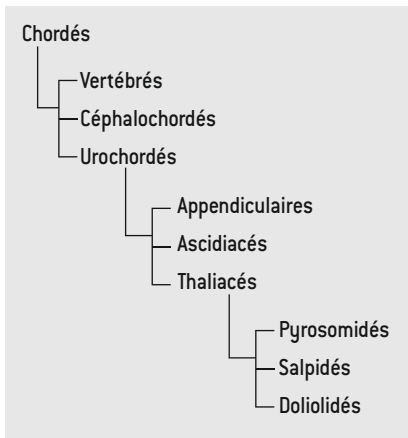


1. UNE SALPE SOLITAIRE
de l'espèce *Thetys vagina*
photographiée dans la baie
de Monterey, en Californie (*en haut*),
et des individus en chaîne
de l'espèce *Pegea confoederata*
(*ci-contre*) photographiés à San Diego,
en Californie. Ces salpes mesurent
respectivement une trentaine
et une vingtaine de centimètres.

L'ESSENTIEL

- Les salpes, organismes gélatineux marins en forme de tonneaux de 1 à 30 centimètres, sont la deuxième forme la plus abondante de plancton animal.
- Grâce à un système de filtration efficace, elles concentrent les particules flottant dans l'eau de mer en pelotes qui coulent vers le fond marin.
- Ces pelotes nourrissent les peuples des abysses et contribuent au stockage du carbone dans les sédiments.
- Son mode de reproduction rapide et l'absence de prédateurs font de la salpe un acteur majeur de l'écosystème marin.

© Richard Herrmann/Minden Pictures/Corbis - © Norbert Wu/Science Faction/Corbis



2. DANS LA CLASSIFICATION DU VIVANT, les salpes (salpidés) sont, comme les vertébrés, issues des chordés, ainsi nommés car ils présentent une corde cartilagineuse dorsale (chorde). Dans leur embranchement (urochordés), tous les membres ont une tunique – une membrane résistante et transparente. Certains (appendiculaires) ont une chorde toute leur vie et vivent en haute mer (pélagiques), d'autres (ascidiacés) sont fixés au fond de la mer. Les thaliacés, dont font partie les salpes, sont tous pélagiques. Les pyrosomidés sont très lumineux et vivent en colonies ; ils forment un manchon avec une tunique commune.

prédateurs ou presque, ils compactent la matière vivante qu'ils absorbent sous forme de grosses particules – des pelotes fécales –, qui tombent vers les fonds marins grâce à leur forte densité. Ces pelotes participent à ce que l'on nomme la neige marine, des particules qui, en tombant, nourrissent les organismes des abysses, là où la lumière ne pénètre plus et où toute vie végétale est exclue. Comment les salpes fabriquent-elles ces pelotes ? Comment envahissent-elles une région et pourquoi ? Quel est leur impact sur leur environnement ? Pour le comprendre, examinons de plus près leur structure, leur mode de vie et leur développement.

L'eau de mer contient en suspension nombre de particules organiques inertes ou animées. Nommés plancton en 1887 par le médecin physiologiste allemand Victor Hensen (du grec *planctos*, qui signifie errer passivement – racine commune aux mots planer et planète), ces organismes vivant en pleine eau sont soit végétaux, soit animaux. Ils peuvent être aussi bien microscopiques unicellulaires, telles les bactéries,

que pluricellulaires et visibles à l'œil nu, avec une taille variant de quelques centimètres ou décimètres, comme certaines méduses, à plusieurs mètres, comme des colonies de siphonophores ou des chaînes de salpes. Le plancton végétal ou phyto-plancton utilise l'énergie du soleil pour se développer à partir des éléments nutritifs dissous dans l'eau. Ses membres (diatomées, dinoflagellés, coccolithophoridés...) sont des algues unicellulaires photosynthétiques de un micromètre à quelques millimètres, parfois munies d'un ou deux flagelles.

Le plancton animal, quant à lui, présente une grande variété de formes, toutes incapables de grands déplacements : des organismes unicellulaires (protozoaires) de quelques micromètres à plusieurs millimètres aux formes étonnantes (ciliés, étoilés...) et des organismes pluricellulaires (méta-zoaires) allant des crustacés planctoniques de quelques millimètres, tels les copépodes, aux méduses et aux mollusques. Les larves et œufs de nombreuses espèces marines (poissons, mollusques, échinodermes) en font aussi partie. Le plancton animal

ANATOMIE D'UNE SALPE

La forme solitaire ou oozoïde de l'espèce *Salpa fusiformis* (décrite pour la première fois sous ce nom par le naturaliste français Georges Cuvier en 1804) est de taille suffisante (trois à quatre centimètres de long) et assez transparente pour que l'on observe ses organes. Elle est aussi assez rigide pour résister aux conditions de capture dans des filets, qui détruisent les individus trop fragiles.

Son corps est une cavité prismatique, à symétrie bilatérale, entourée d'une tunique, une membrane résistante et transparente. Pendant la nage, ses muscles, qui enserrant la cavité, se contractent et chassent l'eau de la cavité par le siphon cloacal. Grâce à la tunique rigide, l'individu reprend sa forme quand les muscles se décontractent. Ce mouvement remplit la cavité en déclenchant l'absorption d'eau *via* le siphon buccal. L'animal est ainsi propulsé en avant : les tuniciers pélagiques sont les inventeurs du moteur à réaction !

L'eau avalée par l'animal ressort filtrée grâce à un filet constitué de fils de mucus entremêlés en un réseau de maille assez étroite pour retenir phytoplancton et bactéries. Le mucus est produit et acheminé par une gouttière ciliée, l'endostyle, jusqu'à l'arc péricoronal, une rangée de cellules ciliées. L'arc récupère le mucus et le répartit en un filet produit en continu tant qu'il y a de la nourriture. Le filet et les particules piégées sont acheminés dans le nucléus, d'où ils ressortent, après digestion partielle, sous forme de pelotes fécales.

1 Siphon buccal

L'eau entre par cette bouche. Deux muscles (un par lèvres) assurent la fermeture de l'orifice au cours de la nage.

2 Tunique cellulosique

Composée de cellulose animale, elle constitue une enveloppe résistante et transparente.

3 Arc péricoronal

Cette rangée de cellules ciliées qui entoure la paroi du pharynx est le prolongement de l'endostyle. Elle récupère le mucus qu'il produit et le répartit en un filet. Sur la face dorsale de l'animal, l'arc aboutit à l'extrémité de la branchie en une fossette ciliée glandulaire, dont le rôle est encore méconnu.

4 Endostyle

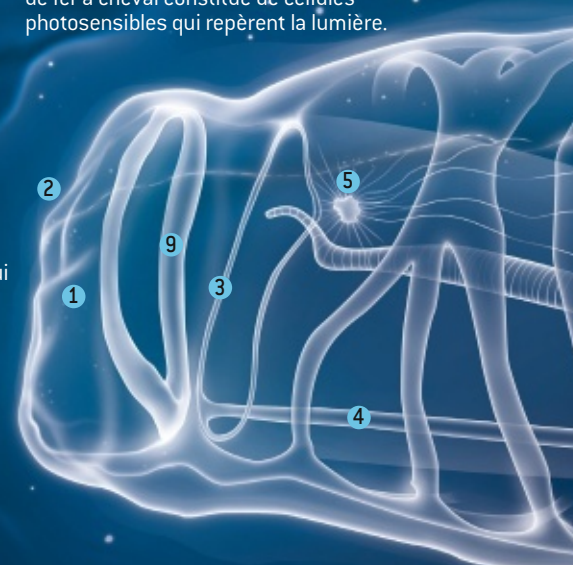
Cette gouttière ciliée longe la face ventrale de la salpe, de la région du nucléus (15) à l'arc péricoronal (3). Elle produit du mucus et le transporte vers l'arc péricoronal.

5 Ganglion nerveux

Ce centre nerveux est en quelque sorte le cerveau de la salpe. Il commande sa dizaine de muscles par l'intermédiaire d'autant de neurones. Il porte un œil pigmenté en forme de fer à cheval constitué de cellules photosensibles qui repèrent la lumière.

6 Filet muqueux

Fabriqué par l'arc péricoronal, ce réseau régulier de fils de mucus forme un cône gonflé par le courant d'eau qui aboutit dans l'œsophage. Il filtre l'eau en retenant les particules de taille supérieure à un micromètre.



consomme le plancton végétal et sert généralement de nourriture aux organismes vivants plus gros et plus agiles tels que les poissons munis de dispositifs pour filtrer l'eau – les harengs, sardines ou anchois, par exemple, qui arborent des branchiospines, sortes de peignes fins sur les branchies – ou les baleines à fanons.

Plus proches des vertébrés que des méduses

Une partie de cette faune, toutefois, semble impropre à la consommation. Il s'agit du zooplancton gélatineux, ainsi nommé à cause de son aspect, dû à sa grande teneur en eau (toujours plus de 95 pour cent du poids frais). Cette composition lui confère une densité proche de celle de l'eau de mer, dans laquelle il se maintient sans effort. Les espèces du zooplancton gélatineux appartiennent à des groupes zoologiques variés, parfois éloignés dans la classification : méduses, mollusques, hydres flottants, siphonophores, tuniciers. Elles ont en commun une grande fragilité et une transparence presque totale.

Les salpes sont une forme de zooplancton gélatineux. Dans la classification du vivant, elles constituent l'ordre des salpés, un des trois ordres de la classe des thaliacés avec les pyrosomidés et les doliolidés. Bien que les salpes ressemblent à des méduses par leur aspect gélatineux et leur vie sans attache, elles s'apparentent structurellement plus aux vertébrés : elles font partie de l'embranchement des urochordés (aussi nommés tuniciers, car ils sont enveloppés d'une membrane constituée d'eau, de protéines et d'un glucide proche de la cellulose, la tunicine). Les urochordés et les vertébrés ont pour ancêtres communs des chordés, caractérisés par la présence, sur leur face dorsale, d'une corde cartilagineuse nommée chorde, ancêtre de la colonne vertébrale (voir la figure 2). Les salpes ont perdu cette chorde, disparue au cours de l'évolution, mais elle est conservée chez d'autres urochordés nommés appendiculaires. Elle est aussi présente

tants, siphonophores, tuniciers. Elles ont en commun une grande fragilité et une transparence presque totale.

■ L'AUTEUR

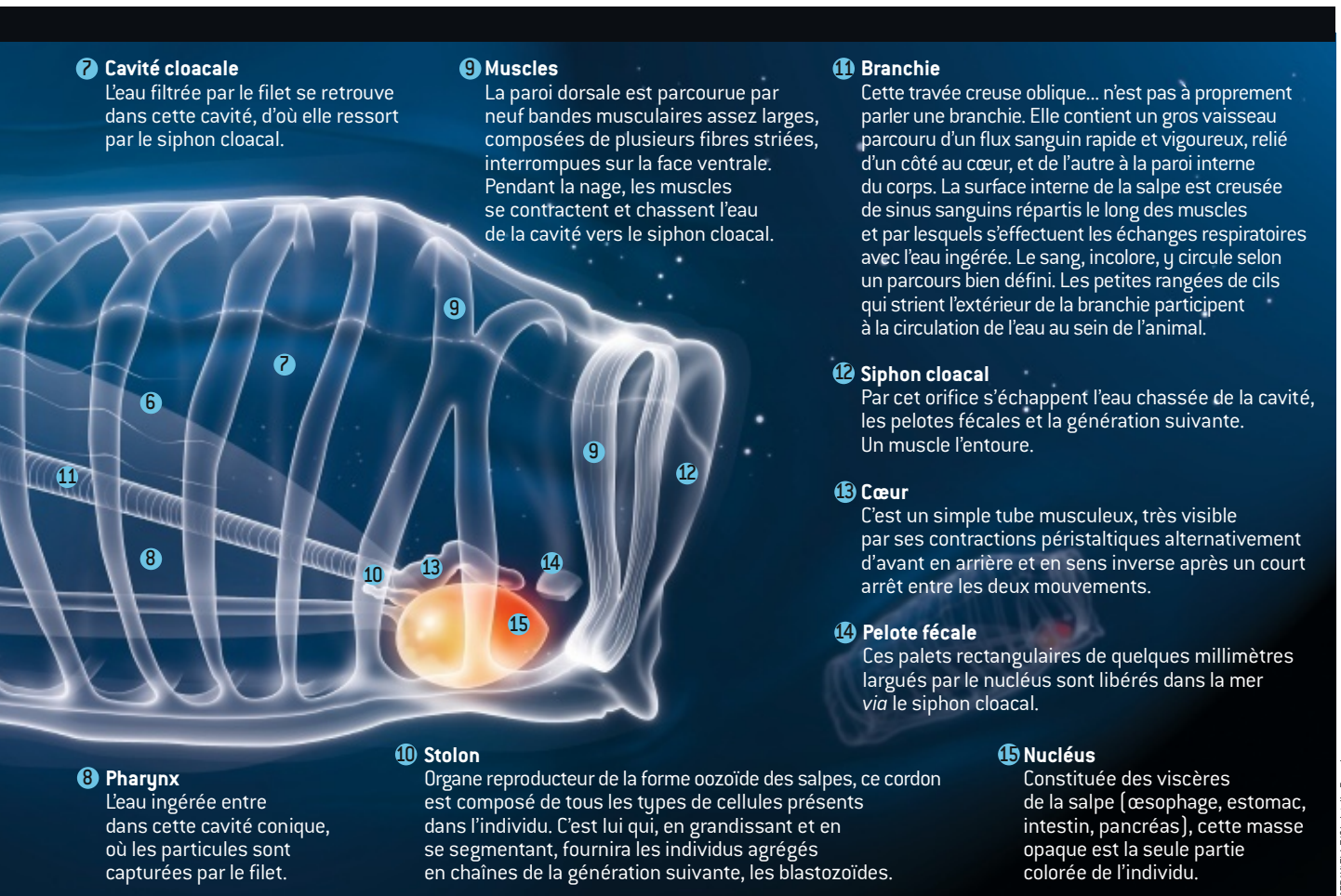


Jean-Claude BRACONNOT est océanographe de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer (CNRS/UPMC), dans les Alpes-Maritimes.

■ SUR LE WEB

Chroniques du plancton

Ce site rassemble de magnifiques films du plancton (dont des salpes) réalisés dans le cadre de l'Expédition *Tara Océans* et de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer (CNRS/UPMC). www.planktonchronicles.org/



7 Cavité cloacale

L'eau filtrée par le filet se retrouve dans cette cavité, d'où elle ressort par le siphon cloacal.

9 Muscles

La paroi dorsale est parcourue par neuf bandes musculaires assez larges, composées de plusieurs fibres striées, interrompues sur la face ventrale. Pendant la nage, les muscles se contractent et chassent l'eau de la cavité vers le siphon cloacal.

11 Branchie

Cette travée creuse oblique... n'est pas à proprement parler une branchie. Elle contient un gros vaisseau parcouru d'un flux sanguin rapide et vigoureux, relié d'un côté au cœur, et de l'autre à la paroi interne du corps. La surface interne de la salpe est creusée de sinus sanguins répartis le long des muscles et par lesquels s'effectuent les échanges respiratoires avec l'eau ingérée. Le sang, incolore, y circule selon un parcours bien défini. Les petites rangées de cils qui strient l'extérieur de la branchie participent à la circulation de l'eau au sein de l'animal.

12 Siphon cloacal

Par cet orifice s'échappent l'eau chassée de la cavité, les pelotes fécales et la génération suivante. Un muscle l'entoure.

13 Cœur

C'est un simple tube musculueux, très visible par ses contractions péristaltiques alternativement d'avant en arrière et en sens inverse après un court arrêt entre les deux mouvements.

14 Pelote fécale

Ces palets rectangulaires de quelques millimètres larges par le nucléus sont libérés dans la mer via le siphon cloacal.

8 Pharynx

L'eau ingérée entre dans cette cavité conique, où les particules sont capturées par le filet.

10 Stolon

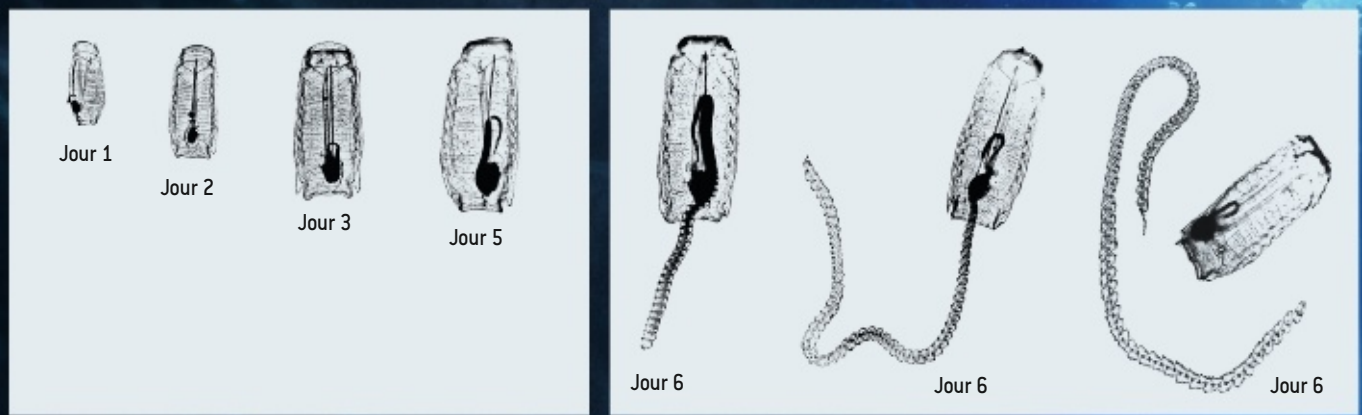
Organe reproducteur de la forme oozoïde des salpes, ce cordon est composé de tous les types de cellules présents dans l'individu. C'est lui qui, en grandissant et en se segmentant, fournira les individus agrégés en chaînes de la génération suivante, les blastozoïdes.

15 Nucléus

Constituée des viscères de la salpe (œsophage, estomac, intestin, pancréas), cette masse opaque est la seule partie colorée de l'individu.

MEDIK/ELLE/Christelle Forzabé

LE CYCLE DE REPRODUCTION DE *SALPA FUSIFORMIS*



A. LE STADE ASEXUÉ DES SALPES. Chaque individu (oozoïde, issu d'un œuf par un stade larvaire, voir l'étape D) mène une vie solitaire, nage, se nourrit par filtration de l'eau et croît. Son organe reproducteur (le stolon) grandit et se segmente en bourgeons accolés.

B. LA LIBÉRATION DE LA GÉNÉRATION SUIVANTE. À une taille suffisante, l'extrémité du stolon de l'oozoïde est émise à l'extérieur via le siphon cloacal. Les bourgeons se gonflent d'eau, révélant de petits individus de salpes attachés les uns aux autres. Les jeunes individus, vrais jumeaux produits par bourgeonnement (blastozoïdes), sont libérés par tronçons successifs d'une centaine tous les deux jours, et au moins cinq ou six fois. Chaque individu se développe au sein de la chaîne.

chez les doliolés (doliolidés) au stade larvaire, qui la perdent au cours de leur développement. Les chordés portent tous, de surcroît, un système nerveux dorsal, constitué, chez les salpes, d'un ganglion nerveux associé à un œil pigmenté.

Un filet à plancton pour se nourrir

Les salpes, comme les autres thaliacés et contrairement aux ascidies, fixées au fond des océans (ou sur des algues elles-mêmes fixées au sol), sont pélagiques : elles vivent en haute mer, à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 800 mètres. En surface, elles se nourrissent du phytoplancton.

Au printemps, lors des grands développements du vivant dans les couches superficielles de la mer (jusqu'à 100 mètres de profondeur) liés à l'élévation de la température et à l'augmentation de l'ensoleillement, on observe de grandes poussées de phytoplancton. Ces organismes unicellulaires microscopiques riches en pigments chlorophylliens se multiplient à grande vitesse par photosynthèse, car la lumière pénètre le milieu. Cette croissance est limitée aux eaux de surface, la lumière diminuant avec la profondeur. Au-dessous de 150 mètres, le noir absolu règne dans tous les océans.

Sortes de petits tonneaux présentant un orifice à chaque extrémité, les salpes se nourrissent en aspirant l'eau de mer et tout ce

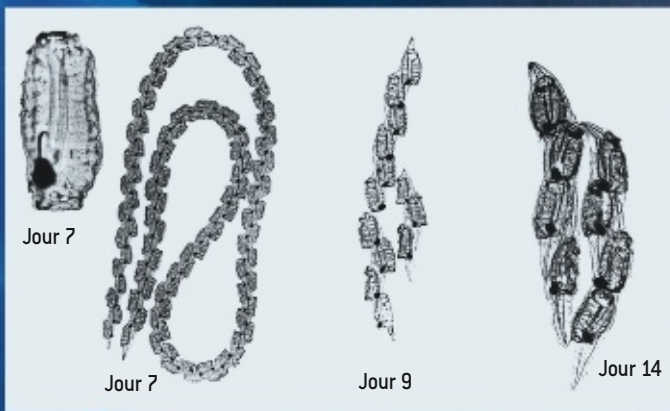
qu'elle contient (tant que la taille est compatible), soit surtout du phytoplancton en surface. L'eau de mer entre par un orifice (siphon buccal) et ressort, filtrée, par l'autre (siphon cloacal) : les salpes retiennent les particules planctoniques qui flottent dans la masse d'eau en filtrant celle-ci à l'aide de leurs sécrétions muqueuses (voir l'encadré page 38). Elles ont en effet inventé... un filet à plancton semblable à celui utilisé chaque jour à la Station zoologique de Villefranche-sur-Mer pour prélever des échantillons de plancton en haute mer.

Les fils de soie ou de nylon sont remplacés par de minces fils de mucus durci organisés en un maillage rectangulaire qui forme un cône flexible entre la « bouche » (siphon buccal) de la salpe et son tube digestif, le nucléus (voir la figure 3a). Lorsque l'eau pénètre dans le pharynx de l'animal (la partie antérieure de la cavité du tonneau), le filet muqueux se gonfle (et il se dégonfle lorsque l'eau filtrée est expulsée). Les particules retenues dans le filet muqueux sont avalées – avec lui – dans l'œsophage, puis l'estomac. Les pelotes fécales, des palets rectangulaires de quelques millimètres de côté, sont le produit de la digestion partielle de ce mélange. Larguées par le nucléus, elles sont rejetées à l'extérieur via le siphon cloacal, tout comme l'eau pure filtrée par l'animal.

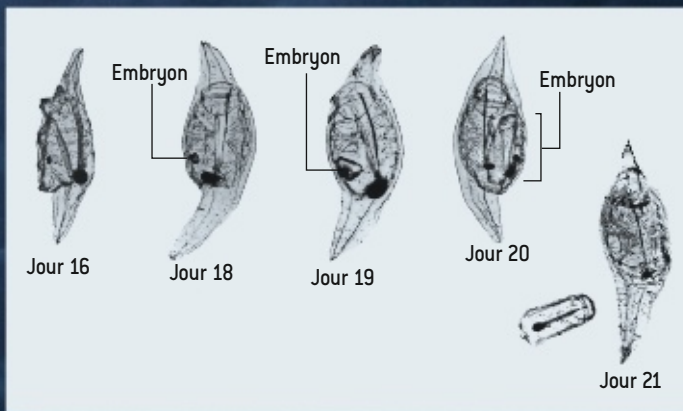
Les salpes de surface sont donc surtout phytophages. De quoi, en revanche, se nourrissent celles observées plus en profondeur,

là où le phytoplancton ne peut plus se développer faute de lumière ? Si la formation du filet muqueux était connue dans ses grandes lignes depuis la fin du XIX^e siècle, l'énigme n'a été résolue qu'en 1991, lorsque nous avons réussi, à la Station zoologique de Villefranche-sur-Mer, à prélever et fixer un échantillon du filet de l'espèce *Pegea confoederata* malgré la fragilité du matériau, et analysé sa structure au microscope électronique à balayage (voir la figure 3b). La petite dimension de la maille rectangulaire était de 0,57 micromètre (un demi-millième de millimètre), pour un individu mesurant plus de dix centimètres ! En d'autres termes, l'animal, parmi les plus grandes formes du macroplancton, est capable de filtrer l'eau de mer jusqu'à en retenir les bactéries qu'elle contient, longues d'environ un micromètre.

Les bactéries constitueraient même une importante source de nourriture pour les salpes. C'est la conclusion à laquelle sont arrivés, en 2010, Kelly Sutherland, de l'Institut océanographique Woods Hole, dans le Massachusetts aux États-Unis, et ses collègues en nourrissant des salpes *Pegea confoederata* avec des billes en polystyrène de 0,5 à 3 micromètres et en mesurant par vidéomicroscopie la vitesse d'impact de ces billes sur le filet muqueux : non seulement les petites billes, même de taille inférieure à la maille du filet muqueux, étaient piégées dans le filtre, mais elles l'atteignaient plus vite que les grandes. Les bactéries étant



C. LE STADE SEXUÉ DES SALPES. Les blastozoïdes sont hermaphrodites séquentiels : d'abord femelles, puis mâles. Les chaînes fragiles se segmentent en groupes d'individus sexués au stade femelle. Chacun possède un ovaire aussitôt fécondé par les produits mâles présents dans l'eau. À la fin de sa croissance, un seul œuf se développe en un embryon attaché à sa mère par un placenta qui le nourrit.



D. L'EMBRYON GRANDIT et occupe de plus en plus de place dans la cavité maternelle. Peu à peu, encore attaché, il montre des mouvements de nage et filtre l'eau pour se nourrir. Quand il atteint une taille suffisante, il est libéré et sort de la cavité de sa mère (toujours attachée à sa chaîne). Il commence alors sa vie solitaire d'oozoïde (voir l'étape A). Sa mère devient alors mâle et termine sa vie en émettant dans l'eau des spermatozoïdes qui féconderont les jeunes chaînes.

abondantes partout dans l'océan et vite digérées du fait de leur petite taille, elles constitueraient donc une part non négligeable de l'alimentation des salpes.

Les bactéries sont ainsi sans doute la source de nourriture qui permet à des salpes de vivre en profondeur (entre 600 et 800 mètres). De telles populations ont été décrites vers 1985-1990, lors de plongées profondes avec le submersible français CYANA10, au cours des missions *MigraGel* (Migrations des Gélatineux) en Méditerranée, au large de Nice-Villefranche: on y a repéré des individus en parfaite forme qui se reproduisaient et vivaient dans le noir absolu, dans des eaux pourtant sans phytoplancton, mais riches en bactéries, comme toute région de l'océan.

En 2006, Laurence Madin, de l'Institution océanographique Woods Hole, et ses collègues ont mis en évidence un autre mécanisme qui expliquerait la vie de certaines salpes en profondeur: au large de la côte Est des États-Unis, l'espèce *Salpa aspera* nage verticalement sur de longues distances, vivant en profondeur le jour (entre 600 et 800 mètres) et remontant en surface la nuit pour se nourrir de phytoplancton.

En surface, les salpes sont loin d'être les seuls consommateurs de phytoplancton. Leur multiplication rapide leur offre toutefois un sérieux avantage sur leurs compétiteurs. Le cycle de développement des salpes est caractérisé par l'alternance de deux générations d'individus anatomique-

Photogrammes

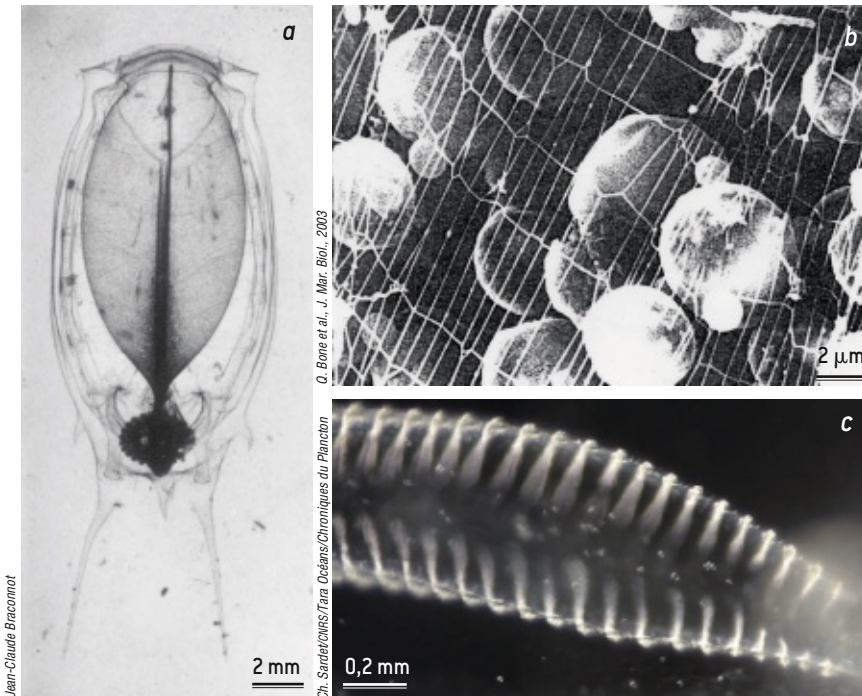
Les représentations ci-dessus ne sont pas des macrophotographies classiques, celles-ci étant impossibles tant les salpes sont fragiles: les manipulations et la chaleur de l'éclairage les détruiraient. Il s'agit de photogrammes, obtenus sans intervention d'appareil photographique ni d'une optique quelconque. On a profité de la transparence des individus pour en obtenir des images en chambre noire à éclairage inactinique (labo photo classique) sur un plan-film photographique à grain très fin, disposé sous un aquarium de faible profondeur où nagent librement et en toute quiétude les animaux, qui restent parallèles au fond. On déclenche un éclair de flash électronique issu d'un diaphragme (un trou de 2,5 millimètres de diamètre dans un carton noir) situé à deux mètres au-dessus de l'aquarium. Ainsi, l'ombre des individus est enregistrée sur le plan-film en une image parfaitement nette qui montre tous les organes de l'individu transparent.

On observe ici le développement, jour après jour, du même individu solitaire maintenu en élevage en chambre fraîche (15°C), puis d'une portion de chaîne dont un individu restera en observation quotidienne pendant toute la gestation de l'embryon, jusqu'à sa libération au 21^e jour de l'élevage. Les tirages (positifs) des photogrammes sont tous à la même échelle. Cette technique a été utilisée pour d'autres organismes transparents, telles des petites méduses ou des larves, ou pour conserver des images d'échantillons de plancton total vivant.

ment différents. Les uns, nommés oozoïdes, sont solitaires, asexués, et issus d'un œuf fécondé qui s'est développé dans les autres. Ces derniers, nommés blastozoïdes, vivent en chaînes nées d'un bourgeonnement des individus solitaires (voir l'encadré ci-dessus).

600 petits en 20 jours

L'oozoïde présente un organe reproducteur caractéristique, une sorte de cordon nommé stolon et composé de tous les types de tissus cellulaires présents dans l'individu. En se segmentant, il fournira les individus agrégés en chaînes de la génération suivante: les blastozoïdes. Chez *Salpa fusiformis*, ici choisie comme organisme modèle pour sa transparence, le blastozoïde a une anatomie proche de celle de l'oozoïde. On y retrouve les mêmes organes, mais l'individu n'est pas symétrique. Les siphons sont reportés vers la face dorsale et la tunique présente des prolongements coniques à l'avant et à l'arrière de l'individu, caractéristiques de l'espèce (d'où le terme *fusiformis*). Les muscles sont différents en nombre et en disposition de ceux de l'oozoïde. Il n'y a pas de stolon, mais, sur la paroi latérale postéro-dorsale, un ovaire est visible. Après fécondation, l'œuf unique se divisera sur place dans son enveloppe folliculaire. Celle-ci formera un placenta par lequel l'embryon restera attaché à sa mère jusqu'à sa libération après son développement.

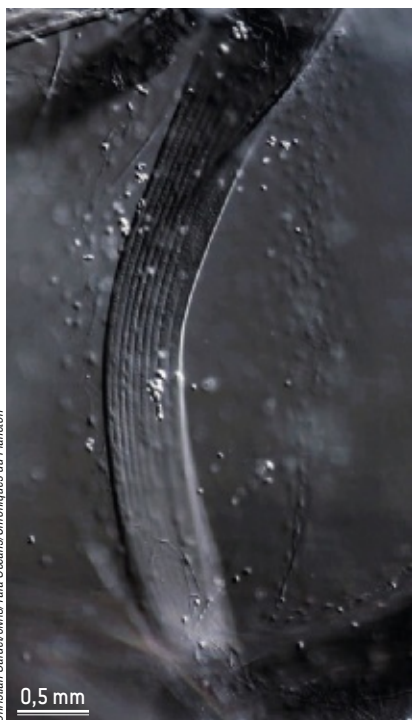


Jean-Claude Bracconot

G. Bone et al., J. Mar. Biol., 2003

Ch. Sardet/CIHRS/Tara Océans/Chroniques du Plankton

3. UN FILET MUQUEUX CONIQUE (a, ici en extension maximale dans la forme oozoïde de l'espèce *Thalia democratica* vue de face) permet aux salpes de filtrer l'eau de mer qu'elles absorbent. Le filet est constitué de mailles rectangulaires assez étroites pour piéger les bactéries [b, ici observé en microscopie électronique à balayage chez la salpe *Pegea confoederata*]. Les salpes sont les plus rapides filtreurs de tout le zooplancton marin. Les cils qui strient la branchie de la salpe créent un courant qui facilite la filtration [c, *Pegea confoederata*].



Christian Sardet/CIHRS/Tara Océans/Chroniques du Plankton

4. LES SALPES SE MEUVENT en se contractant périodiquement grâce à des bandelettes de muscles striés transversales constituées de fibres, ici observées au microscope chez l'espèce *Pegea confoederata*. Le nombre de muscles et leur disposition déterminent la classification des salpidés.

Le cycle de développement des salpes est rapide : en 20 jours, un individu oozoïde a engendré plusieurs centaines de jeunes oozoïdes. Dans des conditions favorables, c'est-à-dire lorsque la nourriture abonde, la multiplication par chaînes de centaines d'individus tous les deux ou trois jours par un seul animal libre aboutit à l'invasion explosive de la masse d'eau au point qu'on observe des proliférations sur des centaines de kilomètres carrés : des bassins marins entiers sont occupés en quelques jours. Cela ne dure jamais longtemps, car la nourriture s'épuise. L'explosion de population cesse, laissant place à une population faible qui cohabite alors avec d'autres espèces planctoniques, ses éventuels compétiteurs dans la même niche écologique. Les différentes espèces de salpes (peu nombreuses, une quinzaine tout au plus) sont présentes dans toutes les mers du globe. *Salpa fusiformis* produit de grandes populations envahissantes aussi bien en Méditerranée au printemps qu'en mer du Nord et autour des îles Britanniques, ou en océan Antarctique.

L'importance des salpes en masse de matière vivante dans nos eaux, l'efficacité de leur action de filtration de l'eau témoignent de l'ampleur de leur rôle dans l'écosystème pélagique, de haute mer. En filtrant

l'eau de mer en permanence, elles assurent la digestion partielle et l'agglomération de matière végétale et animale en grosses particules denses et compactes, les pelotes fécales. Rejetées dans le milieu, ces pelotes plongent vite vers le fond des mers, où elles servent de nourriture aux espèces vivant plus en profondeur, y compris celles qui sont inféodées au fond lui-même. Cela semble être l'une des explications de la présence animale dans les ténébreux fonds sous-marins, là où, privé de lumière, le plancton nourricier ne peut se développer.

Des pelotes fécales pour stocker le carbone

Il y a une vingtaine d'années à la sortie de la rade de Villefranche-sur-Mer, François Fernex, un géologue spécialiste des couches superficielles du fond marin, a ainsi montré que les pelotes fécales des salpes augmentaient la teneur en substances azotées des premiers centimètres du sédiment déposé sur les fonds marins vers 80 mètres de profondeur. En analysant des prélèvements effectués entre 1987 et 1990, F. Fernex s'est aperçu que le sédiment de 1987 présentait une faible teneur en produits azotés, tandis qu'ils étaient abondants dans celui de 1990. Or le printemps 1987 a été marqué par un développement de populations de petits crustacés (copépodes) se nourrissant du plancton végétal. Ces petits crustacés produisent des pelotes fécales microscopiques, légères, qui ne plongent pas et sont recyclées avant d'atteindre le fond. En revanche, en 1990, la population de copépodes ne s'est pas développée, car les salpes, particulièrement nombreuses, ont consommé tout le plancton végétal, pourtant abondant au printemps. Leurs pelotes fécales, riches en azote, ont rapidement atteint le fond, augmentant cette année-là la quantité d'azote dans les sédiments.

Des études plus récentes ont permis de préciser le rôle des salpes dans le cycle du carbone. L'océan joue un rôle majeur dans ce cycle en absorbant le dioxyde de carbone de l'atmosphère. À sa surface, le phytoplancton utilise ce carbone pour se développer, avant d'être consommé par le zooplancton et autres animaux. Puis le carbone est rejeté dans l'océan sous forme de matière fécale, ou lorsque l'animal meurt. En général, le carbone se dissout dans l'océan, où soit il est réutilisé par les plantes, soit il s'échappe dans l'air sous forme de dioxyde de carbone. En tom-

bant dans le fond marin, les pelotes fécales des salpes alimentent une autre voie, rapide et directe, de recyclage du carbone. En 2009, d'après les mesures de vitesse de défécation de *Salpa thompsoni* effectuées lors de deux croisières à l'Ouest de la péninsule Antarctique en 2004 et 2006, L. Madin et ses collègues ont calculé qu'une population dense de ces salpes, représentant plus de 400 milligrammes par mètre carré de carbone, produit environ 20 milligrammes de carbone par mètre carré et par jour *via* sa matière fécale. Si une partie est mangée, la majorité de cette matière fécale atteint le fond marin, où elle rejoint la couche sédimentaire. Cette couche stocke le carbone en se minéralisant.

Par la taille de leurs « essaims », les salpes, lorsqu'elles meurent, contribuent probablement aussi de façon non négligeable à la fossilisation du carbone dans les sédiments. C'est ce que suggère la découverte de plusieurs dépôts de thaliacés dans les fonds marins durant les dernières décennies, notamment en 2009 par Mario Lebrato, de l'Institut Leibniz de science marine, à Kiel en Allemagne, et ses collègues. Les sal-

pes ayant peu ou pas de prédateurs, leurs débris tombent au fond des océans, où les produits de leur décomposition se minéralisent. Les biologistes ont mesuré que les tissus des thaliacés des dépôts trouvés contenaient un tiers de carbone en poids.

Aujourd'hui, plusieurs équipes dans le monde étudient les caractéristiques des « essaims » de salpes – leur taille, les conditions de leur développement, leur vitesse de croissance en fonction de la température ou de la quantité de phytoplancton disponible, leur évolution selon les saisons – afin de préciser leur impact sur l'écosystème marin. Pourquoi les salpes prennent-elles le dessus certaines années ? Comment régulent-elles leur activité reproductive en fonction de la nourriture disponible ? Peut-on évaluer la quantité de carbone stocké grâce à elles ? De nombreuses questions entourent encore ces organismes, dont même les mécanismes internes n'ont pas livré tous leurs secrets : le mécanisme permettant une production du filet muqueux continue et adaptée à la quantité de nourriture disponible n'a toujours pas été élucidé... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. D. Everett *et al.*, **Three-dimensional structure of a swarm of the salp *Thalia democratica* within a cold-core eddy off southeast Australia**, *J. of Geophys. Res.*, vol. 116, C12046, 2011.

K. R. Sutherland *et al.*, **Filtration of submicrometer particles by pelagic tunicates**, *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1003599107, 2010.

B. Phillips *et al.*, **Defecation by *Salpa thompsoni* and its contribution to vertical flux in the Southern Ocean**, *Mar. Biol.*, vol. 156, pp. 455-467, 2009.

Q. Bone *et al.*, **Tunicate feeding filters**, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, vol. 83, pp. 907-919, 2003.

Q. Bone (sous la dir.), **The Biology of Pelagic Tunicates**, Oxford University Press, 1998.

G. Seguin et J.-C. Braconnot, **Le plancton**, PUF, 1997.



L'association Objectif Science
pour la promotion des sciences et de la technologie
vous propose

Communication offerte par



Vous avez entre 14 et 20 ans
Vous aimez les sciences et la technologie

Participez au concours



Concours sur projet organisé par Sciences à l'École
en partenariat avec la fondation C.Génial





Finale nationale
Palais de la Découverte, Paris

Date limite d'inscription : 16 novembre 2012

Renseignements : www.objectifscience.org

L'astronomie en ballon

Françoise Delcelier-Douchin

L'arsenal des astronomes ne se limite pas aux télescopes terrestres et spatiaux. Les ballons stratosphériques permettent aussi de réaliser des observations précises.

M. Janssen avait prêté à Crocé-Spinelli un petit spectroscopie, en lui indiquant les points à observer. Il s'agissait surtout de savoir ce que devenaient, dans les hautes régions, les deux bandes obscures qui se trouvent à droite et à gauche de la double raie du sodium et qui sont celles de la vapeur d'eau. M. Janssen, qui leur attribue une origine terrestre, pensait que si l'on s'élevait suffisamment haut dans l'atmosphère pour laisser au-dessous de soi presque toute la vapeur d'eau, les bandes devaient devenir tout à fait invisibles.

L'Aéronaute, 1874

Cet extrait de journal publié en mai 1874 décrit la première expérience d'astronomie en ballon conduite à Bar-sur-Seine par les Français Joseph Crocé-Spinelli et Théodore Sivel à bord de *l'Étoile Polaire*. Ces pionniers de l'astronomie en ballon voulaient savoir si l'atmosphère altère les observations du Soleil et des étoiles effectuées depuis le sol. Ils mirent en évidence des effets perturbateurs : certaines longueurs d'onde sont absorbées par l'épaisse couche d'air, et des turbulences empêchent d'obtenir des images nettes. Crocé-Spinelli et Sivel démontraient ainsi l'intérêt de l'astronomie en ballon : en réalisant les observa-

tions au-dessus de l'atmosphère, on éviterait ces perturbations. Mais, en 1875, les deux Français moururent d'hypoxie – un manque d'oxygène – lors d'un vol ayant atteint 8600 mètres d'altitude.

Malgré cet accident, les astronomes ont continué à utiliser les ballons pour étudier le ciel. En 1912, l'Autrichien Victor Hess découvrit l'origine des rayons cosmiques lors de mesures en ballon. Il fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1936 pour ces observations, ouvrant la voie à l'étude des astroparticules, domaine de recherche qui utilise, encore aujourd'hui, des ballons pour transporter des instruments de mesure à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

Les ballons modernes utilisés pour les expériences scientifiques n'emportent plus d'équipage et sont contrôlés depuis le sol, mais le principe reste le même : une enveloppe de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes enferme un gaz plus léger que l'air. Une nacelle, contenant des instruments de mesure, est accrochée à des sangles reliées au ballon. Divers progrès réalisés depuis les premiers ballons permettent d'assurer des vols à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude, sur des durées plus longues

L'ESSENTIEL

- Les ballons peuvent emporter à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude des instruments scientifiques. Ils offrent la possibilité de faire des mesures d'astronomie de qualité.
- L'expérience **PILOT**, prévue pour 2013, étudiera le rayonnement diffusé par les poussières galactiques.
- Les missions en ballon présentent une grande fiabilité, une souplesse et une simplicité des opérations de lâcher ainsi qu'une grande complémentarité avec les missions spatiales.

ONIS



et avec une bonne stabilité, ce qui permet de faire des mesures de qualité.

Pour illustrer le fonctionnement des ballons utilisés par les astrophysiciens, nous suivrons le déroulement, de sa préparation à son retour au sol, de l'expérience PILOT (*Polarized Instrument for Long-wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium*, ou Instrument polarisé pour les observations à grandes longueurs d'onde de la matière interstellaire ténue), un projet international prévu pour l'année 2013. Cette mission est mise au point par le CNES (Centre national d'études spatiales) qui coordonne le vol et l'IRAP (Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse) qui développe le télescope. L'IAS (Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay) ou encore le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) participent également à ce projet.

Quelques dizaines de vols de ballons à but scientifique sont organisés chaque année par le CNES, la NASA (l'Agence spatiale américaine), ou la JAXA (l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise). À noter que l'astronomie n'est pas le seul domaine qui utilise les ballons ; elle représente d'ailleurs une part minoritaire des vols au CNES. La plupart des missions en ballon portent sur la chimie ou la dynamique de l'atmosphère.

Étudier la poussière galactique

Suivant la date à laquelle sera prêt l'instrument PILOT et en fonction de la disponibilité des sites de lâcher, le ballon décollera de la nouvelle base de Timmins dans l'Ontario, au Canada, ou de Kiruna en Suède.

PILOT étudiera le champ magnétique de la galaxie, sa structure, ses interactions avec la poussière interstellaire, ou encore son rôle dans les nuages moléculaires où se forment les étoiles. Il s'agira d'observer la lumière polarisée diffusée par la poussière, dont la distribution spatiale permettra de reconstruire le champ magnétique galactique. En précisant les caractéristiques de ce champ magnétique, il sera possible d'améliorer la connaissance du « fond diffus cosmologique », lequel est étudié, par exemple,

1. OPÉRATION DE GONFLAGE d'un ballon à l'hélium, en vue d'une mission scientifique à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

par le satellite *Planck*. Ce rayonnement émis par l'Univers âgé de quelque 380 000 ans révèle de nombreuses informations sur l'Univers primordial. Les caractéristiques de ces photons indiquent les conditions régnant dans l'Univers jeune, mais les photons émis plus tard se mélangent au flux primordial qui nous parvient et perturbent les observations. Par conséquent, il faut pouvoir séparer les photons du fond diffus cosmologique des photons plus jeunes, d'avant-plan. Le rayonnement du fond diffus étant polarisé, il est crucial de connaître les effets de la polarisation dus à la poussière interstellaire.

L'expérience PILOT illustre la complémentarité des missions d'astrophysique en ballon et des missions spatiales: les données recueillies par les premières peuvent servir de précurseurs pour les secondes. Cet exemple n'est pas unique. Ainsi, des instruments sous ballon, tels que *Archeops* (voir l'encadré page 49) ou BOOMERanG, ont établi des cartes du fond diffus cosmologique d'une grande précision. *Archeops* a aussi permis de tester certains détecteurs qui ont été ensuite utilisés par le satellite *Planck*. Dans un autre domaine, l'expérience CREAM (voir l'encadré page 50) effectuera son septième vol en 2012 pour étudier la nature des rayons cosmiques, ce qui est aussi la mission scien-

■ L'AUTEUR



Françoise DELCELIER-DOUCHIN est ingénieure au Centre spatial de Toulouse du CNES. Elle est responsable du développement des filières aérostatiques.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Lebeau et J.-P. Sanfourche (sous la dir. de), *Les ballons au service de la recherche; l'aérostation des origines à nos jours*, E-dite, 2011.

tifique du détecteur AMS installé sur la Station spatiale internationale.

Les astrophysiciens disposent de trois techniques pour réaliser des observations: les grands télescopes au sol, les missions spatiales (sur satellite) et les ballons. Elles présentent toutes des atouts et des limites qui leur sont propres.

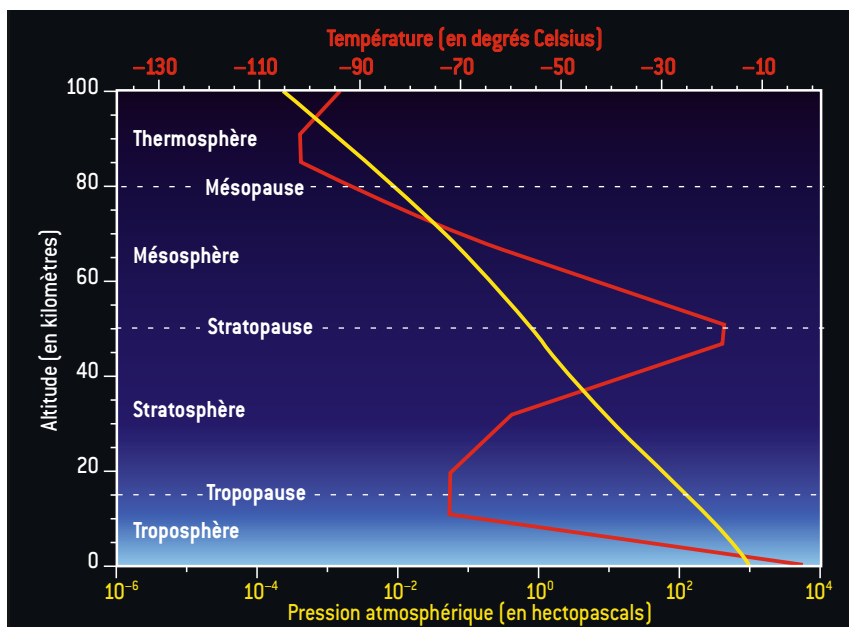
Les télescopes au sol ne sont limités ni par le poids ni par la taille, mais par les perturbations créées par l'atmosphère. Les satellites sont positionnés à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude et peuvent effectuer des observations en continu sur de très longues périodes (jusqu'à plusieurs années); cependant, ces expériences sont lourdes à mettre en place et coûtent cher. Enfin, les ballons – ou aérostats – imposent moins de contraintes mécaniques, telles que la résistance aux accélérations et aux vibrations, que les expériences embarquées sur satellite. La conception ne nécessite que quelques années, contre une dizaine pour une expérience spatiale, avec un coût réduit. De surcroît, à la fin d'un vol, on peut récupérer les instruments scientifiques et les améliorer pour les vols suivants.

En revanche, les missions d'astrophysique en ballon sont limitées par la durée d'un vol – de quelques heures à quelques jours – et par la masse de la charge utile transportée, qui ne peut guère excéder deux tonnes.

La météo, élément incontournable de la planification

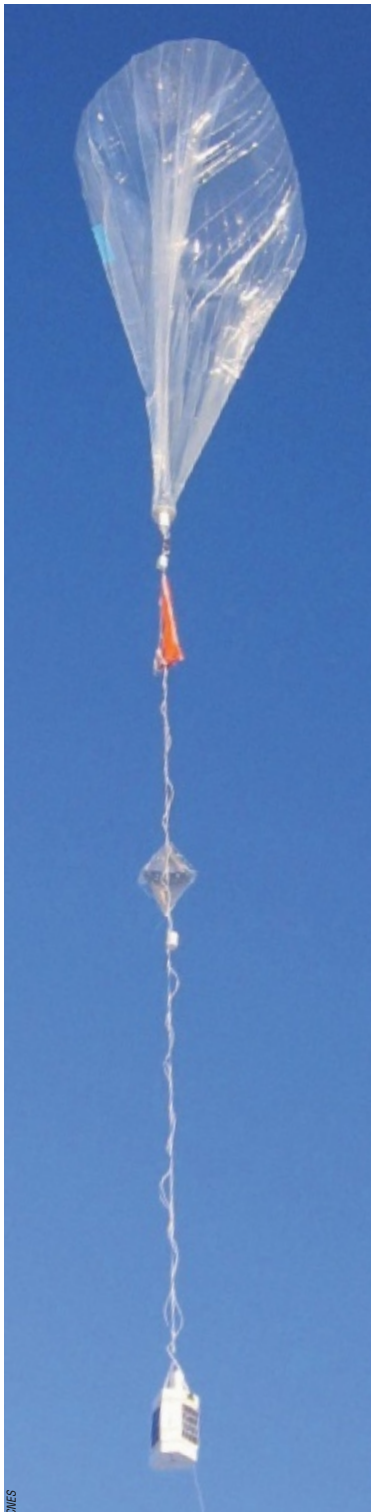
D'un point de vue technique, pour emporter l'instrument scientifique dans les airs, l'enveloppe du ballon doit contenir un gaz moins dense que l'air, tel l'hydrogène ou l'hélium (suivant le principe d'Archimède). Certains types de ballons, telles les montgolfières à infrarouges utilisées pour des missions scientifiques (très différentes des montgolfières de loisir qui emportent des passagers et volent à basse altitude), ont pour gaz porteur de l'air chauffé contenu dans l'enveloppe.

Une fois lâché, l'aérostat s'élève et se déplace en fonction de la vitesse du vent, de la température, de la pression atmosphérique... Il n'est pas possible de contrôler précisément la direction du vol. L'équipe de pilotage au sol peut, tout au plus, influencer sur l'altitude du ballon en larguant plus ou moins de lest et en ouvrant un clapet

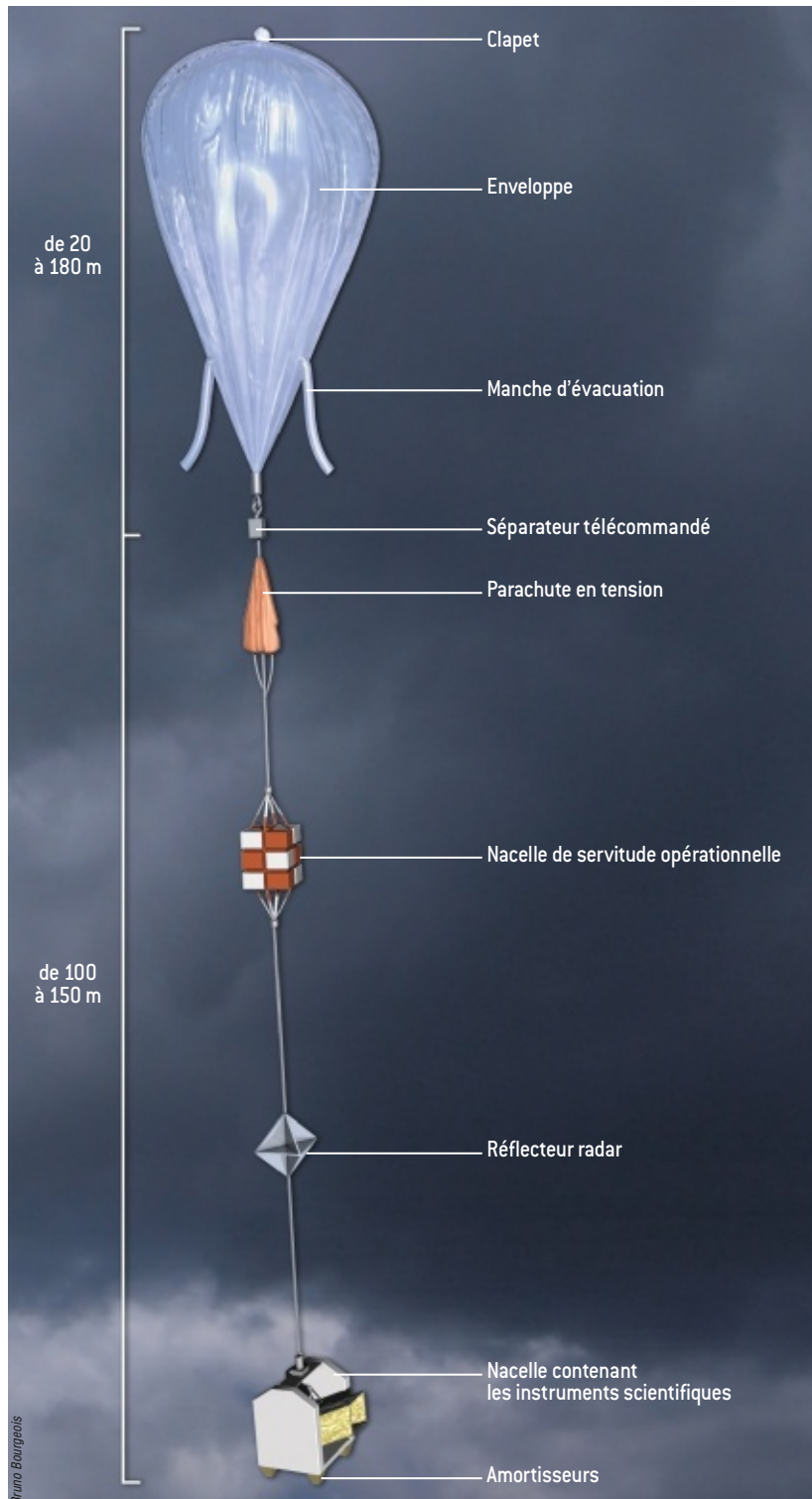


2. PROFIL DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE indiquant l'évolution de la pression et de la température. La pression diminue régulièrement depuis le sol. La température diminue avec l'altitude dans la troposphère, puis augmente dans la stratosphère, où l'air est réchauffé par l'absorption des rayons ultraviolets du Soleil.

LE BALLON STRATOSPHERIQUE OUVERT



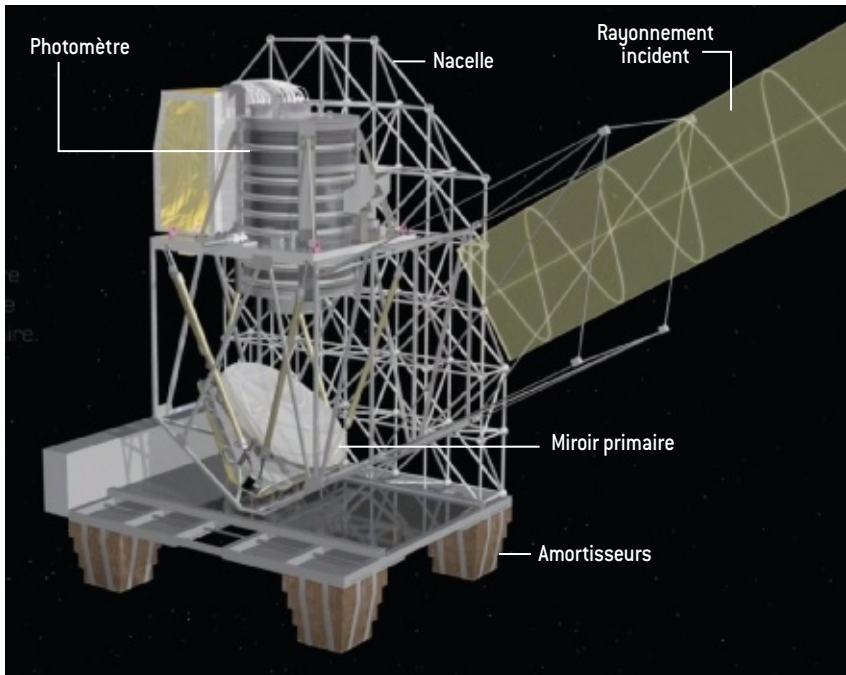
CMES



Bruno Bourgeois

Un ballon est constitué de deux éléments principaux : l'enveloppe de polyéthylène, contenant le gaz, et la chaîne de vol, sur laquelle sont accrochés un certain nombre d'éléments tels que le parachute, plusieurs systèmes de signalisation et de positionnement (réflec-

teur radar, balises et un récepteur pour le système de géolocalisation GPS). La nacelle de servitude assure la communication avec le pilote au sol et le transfert des données enregistrées par les instruments embarqués dans la nacelle scientifique.



3. LE TÉLESCOPE DE PILOT EST CONSTITUÉ DE PLUSIEURS ÉLÉMENTS : un baffle (*non représenté*) protège le miroir primaire de la lumière parasite qui vient d'autres directions et perturbe la mesure. Le miroir, de 83 centimètres de diamètre, renvoie la lumière vers le photomètre placé verticalement au-dessus. Ses détecteurs, des bolomètres refroidis à 300 millikelvins par de l'hélium, transforment le rayonnement électromagnétique en chaleur, qui est ensuite convertie en signal électrique. Des filtres placés à l'avant des détecteurs permettent d'étudier la polarisation du rayonnement à des longueurs d'onde de 240 et 550 micromètres.

d'échappement du gaz placé au sommet du ballon. Il est alors possible de chercher une « veine de vent » dans une couche d'air, plus favorable à la direction souhaitée. Ainsi, la première étape dans la préparation du vol d'un ballon est d'estimer la trajectoire de l'aérostat en fonction des conditions météorologiques. On effectue cette étape environ cinq heures avant le décollage.

Connaître la trajectoire est crucial : la réglementation de l'aviation civile nécessite une coordination aéronautique lorsque le ballon traverse des couloirs aériens, et les règles de sauvegarde du CNES imposent d'éviter les axes de circulation, les agglomérations et les sites industriels comme lieu d'atterrissage. Qui plus est, à la fin de la mission, la nacelle doit se poser dans une région ni trop humide ni trop accidentée, pour que les instruments ne soient pas détériorés et que l'on puisse les récupérer sans trop de difficultés.

Différents types d'aérostats sont utilisés pour des missions scientifiques dans la stratosphère (à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude). Les plus courants sont le ballon stratosphérique ouvert, le ballon pressurisé stratosphérique et la montgolfière à infrarouges (nous y reviendrons). La

mission PILOT utilisera un ballon stratosphérique ouvert. Ce choix est lié aux exigences de la mission. En effet, l'instrument scientifique pèse 1,1 tonne et doit atteindre une altitude de croisière de 40 kilomètres. La masse à emporter exige un volume de gaz important, ce qui conduit au choix d'une enveloppe d'un volume de 800 000 mètres cubes – environ la moitié du volume occupé par la tour Eiffel.

Préparer le ballon : une opération délicate

Si la météo au sol le permet, les équipes préparent l'aérostat : elles injectent la quantité nécessaire d'hélium dans l'enveloppe et préparent la « chaîne de vol ». Le gonflage du ballon est une opération délicate, car l'enveloppe est très fragile. Elle est constituée de 157 bandes de polyéthylène translucide de 180 mètres de longueur, 2,7 mètres de largeur (au maximum) et de 15 à 25 micromètres d'épaisseur. Les bandes sont soudées à chaud au moyen de rubans, qui assurent l'étanchéité et la tenue mécanique de l'enveloppe. Le polyéthylène utilisé est souple et résiste aux températures très basses qui peuvent régner entre 10 et 20 kilo-

mètres d'altitude, à condition que la vitesse de montée du ballon soit ajustée par le pilote.

Pendant que l'enveloppe est préparée, les éléments de la chaîne de vol, longue d'une centaine de mètres (*voir l'encadré page 47*) sont assemblés. Plusieurs équipements assurent le signalement du ballon aux autorités aériennes. Un élément important de la chaîne de vol est la nacelle de servitude, qui assure la communication avec le pilote ainsi que le transfert des données enregistrées par l'instrument. Celles-ci sont transmises au sol par liaison radiofréquence à haut débit quand l'aérostat est dans le champ de l'antenne au sol ou *via* un satellite de télécommunication pour les liaisons ne nécessitant pas de haut débit.

À l'extrémité de la chaîne de vol est installée la nacelle PILOT, constituée de barres et de boules d'aluminium. Cette structure, d'environ deux mètres de côté et cinq de hauteur, abrite le télescope (*voir la figure 3*). Un parachute est placé à l'autre extrémité de la chaîne de vol, près du ballon. À la fin de la mission, le pilote commande la séparation entre l'enveloppe et la chaîne de vol. Le parachute s'ouvre automatiquement pour ralentir la chute de la chaîne de vol, tandis que l'enveloppe redescend seule.

Lors du décollage, pour éviter que la nacelle scientifique soit traînée au sol, celle-ci est suspendue à un système auxiliaire : une grue ou des petits ballons qui suffisent à la soulever du sol. La seconde méthode est privilégiée par le CNES. Quand le ballon principal est lâché, il soulève la chaîne de vol, qui atteint progressivement la position verticale. À ce stade, les ballons auxiliaires se décrochent.

Au départ, le volume de gaz injecté dans l'enveloppe est 100 à 200 fois inférieur à la capacité du ballon. Les ballons stratosphériques ouverts sont équipés de manches à air à la base de l'enveloppe, qui assurent un équilibre de la pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon. La pression atmosphérique diminuant avec l'altitude (*voir la figure 2*), le volume occupé par l'hélium augmente progressivement (conformément à la loi des gaz parfaits). La taille de l'enveloppe est déterminée en fonction de la quantité de gaz nécessaire pour arracher l'aérostat du sol et l'élever, et en fonction du volume qu'occupera ce gaz à l'altitude maximale où l'instrument effectuera ses mesures.

PILOT atteindra une altitude de 40 kilomètres en deux heures environ. Le ballon traversera la troposphère – la région de l'atmosphère la plus basse dont la limite se situe

entre 10 et 20 kilomètres d'altitude –, puis gagnera la stratosphère.

La température diminue dans la troposphère, puis augmente dans la stratosphère, qui absorbe le rayonnement ultraviolet du Soleil et se réchauffe. Lorsque la pression diminue, l'hélium se détend, ce qui le refroidit. Dans certaines zones, l'enveloppe de polyéthylène peut atteindre une température de $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$; elle devient alors rigide, cassante et l'ensemble du ballon risque de retomber en chute libre. Le refroidissement est d'autant plus important que l'aérostat s'élève rapidement. Pour ne pas risquer de perdre le ballon le pilote surveille la température et contrôle la vitesse d'ascension en actionnant le clapet, placé au sommet de l'enveloppe, d'où s'échappe du gaz. Inversement, une baisse de la température de l'hélium par rapport à l'air extérieur peut réduire la poussée verticale et stopper le ballon. Le pilote relance alors l'ascension de l'aérostat en larguant du lest, placé dans un bac sur la chaîne de vol.

À l'approche du plafond, le ballon se stabilise après une phase d'oscillations autour de la position d'équilibre. Commence alors l'enregistrement des données.

PILOT étudiera le rayonnement polarisé émis par la poussière interstellaire dans notre Galaxie. Pour reconstruire la structure du champ magnétique galactique à partir de ces mesures, il importe d'obtenir une bonne résolution angulaire. Il faut donc une grande stabilité de l'instrument et un système de positionnement précis.

Stabiliser le télescope

Comment y parvenir alors que le ballon est parfois poussé par des vents de plus de 300 kilomètres par heure? La nacelle, qui accueille l'instrument scientifique, assure ce rôle. Le télescope est fixé sur une plateforme qui est reliée à la nacelle par un système d'axes, de pivots et vérins qui limitent les vibrations et assurent un positionnement avec une résolution inférieure à cinq secondes d'arc (environ $0,0014\text{ degré}$). Un capteur, le « senseur stellaire », ayant la même ligne de visée que l'instrument, compare la position des étoiles visibles dans le ciel avec une carte préenregistrée. Il calcule alors l'orientation de l'instrument et en ajuste la direction.

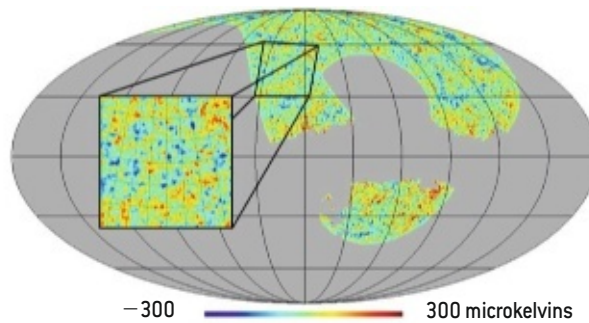
Le premier vol de la mission est programmé pour durer une seule nuit. La prise de données commencera au coucher du soleil et se terminera au lever, car le senseur stellaire ne fonctionne pas le jour. Pourquoi ne pas prolonger le vol sur plusieurs nuits et ainsi collecter davantage de données?

C'est une question de stratégie sur la durée globale du vol: après la première nuit, le Soleil réchauffe l'hélium qui augmente alors de volume; pour ne pas contraindre l'enveloppe par la surpression induite, les ballons ouverts disposent à leur base de manches d'évacuation d'où peut s'échapper le surplus de gaz. La nuit suivante, l'enveloppe contient donc moins de gaz; la poussée d'Archimède étant moins importante, le ballon ne reste pas à l'altitude souhaitée et se stabilise plus bas. Par conséquent, le rayonnement galactique doit traverser une plus grande épaisseur d'atmosphère pour atteindre le détecteur, de sorte qu'il est davantage absorbé que la nuit précédente: les mesures ne seraient pas comparables.

Pour compenser la perte de gaz, on pourrait larguer du lest, mais cela représente une masse notable (six pour cent

ARCHEOPS : UN OBSERVATEUR DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Le rayonnement du fond diffus cosmologique est une source précieuse d'informations sur l'âge de l'Univers, sa composition et l'origine des grandes structures que sont les galaxies et les amas de galaxies. Cette première lumière émise lorsque les atomes se sont formés, quelque 380 000 ans après le Big Bang, est aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes (entre le domaine radio et l'infrarouge) en raison de l'expansion de l'Univers. Elle constitue l'essentiel de l'énergie sous forme de rayonnement dans l'espace, mais il est très difficile de la cartographier en détail. En effet, l'eau de l'atmosphère terrestre absorbe les rayonnements de cette gamme. Il faut donc observer depuis une région où l'air est très sec (en Antarctique par exemple), en ballon stratosphérique ou via un satellite. Embarquer les instruments dans un ballon stratosphérique a été la solution adoptée par les expériences BOOMERANG, MAXIMA et *Archeops* dans les années 2000. Leurs observations du rayonnement fossile



Carte du rayonnement fossile réalisée à partir de 12 heures d'observation par l'expérience *Archeops*. On observe les fluctuations par rapport à la température moyenne de $2,7\text{ kelvins}$.

ont ouvert l'ère de la cosmologie de précision.

Le projet du satellite *Planck*, entrepris par l'Agence spatiale européenne en 1993, prit du retard en raison de l'échec de la mise en orbite de *Cluster* – mission qui devait étudier la magnétosphère terrestre. Les éléments de son instrument haute fréquence (HFI) étaient prêts: les détecteurs américains – bolomètres convertissant le rayonnement en cha-

leur – pour mesurer d'infimes variations de température, le système optique anglais et le dispositif cryogénique français pour refroidir les détecteurs à $0,1\text{ kelvin}$. Ils ont été utilisés pour le projet *Archeops*. Pour cartographier le rayonnement fossile sur une large partie du ciel avec une bonne résolution angulaire, il faut un vol de longue durée permettant d'observer le ciel longtemps, à une altitude stratosphérique pour être au-dessus de

l'atmosphère, de nuit pour ne pas être perturbé par l'émission thermique du Soleil et avec une nacelle en rotation pour que le télescope décrive de grands cercles dans le ciel. Le troisième vol, le 7 février 2002, a permis d'obtenir une carte de 33 pour cent du ciel en 12 heures d'observations scientifiques. En plus d'avoir confirmé la fiabilité de l'instrument, *Archeops* a fourni des observations précieuses sur la Galaxie et a positionné précisément le premier pic du spectre de puissance angulaire des anisotropies du rayonnement fossile. Ainsi, *Archeops* a montré que la géométrie de l'espace-temps de notre Univers est bien plate, quelques semaines avant les premiers résultats du satellite WMAP qui a fourni une carte complète du fond diffus cosmologique.

Le satellite *Planck* a été lancé en 2009 et l'instrument HFI, très proche de celui de *Archeops*, tient toutes ses promesses.

Cécile Renault
LPSC, Grenoble

CREAM, un ballon pour étudier le rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique, découvert en 1912 par Victor Hess et constitué de particules qui bombardent la Terre, reste l'objet de nombreuses recherches. Comme il interagit avec l'atmosphère, il faut, pour l'étudier, placer les détecteurs à très haute altitude le plus longtemps possible soit dans l'espace, soit au-dessus de l'atmosphère à l'aide d'un ballon.

L'Antarctique est un site privilégié pour réaliser ce type de mission, et ce pour plusieurs raisons. Pendant l'été austral, le vortex polaire, un cyclone de grande taille qui reste localisé au-dessus de l'Antarctique, se met en place pendant toute la saison. Ce courant dominant dans la

haute atmosphère permet de « contrôler » la trajectoire du ballon en orbite autour du pôle. En outre, l'ensoleillement constant en été permet d'alimenter les panneaux solaires du ballon et de maintenir le ballon à une altitude constante sur une longue durée, car les écarts de température sont faibles (42 jours pour le vol CREAM – *Cosmic Ray Energetics and Mass* – de 2005).

CREAM est un instrument visant à étudier la composition du rayonnement cosmique entre 10^{12} et 10^{15} électronvolts. On a ainsi mesuré la charge et l'énergie des particules. Pour estimer cette seconde caractéristique, CREAM comporte

un calorimètre formé d'un ensemble de plaques de tungstène. Les particules qui le traversent y interagissent et se désintègrent en une gerbe de plusieurs particules. Des fibres scintillantes, disposées entre les plaques de tungstène, permettent de détecter l'énergie déposée par une gerbe et, par conséquent, celle de la particule initiale. Pour mesurer la charge des particules, on utilise deux techniques complémentaires et indépendantes : la mesure de l'ionisation dans des plans de silicium et la production de lumière Cherenkov (onde lumineuse produite par une particule qui se déplace, dans un milieu donné, plus rapidement que la

lumière), détectée par un plan de photomultiplicateurs dans le détecteur nommé *CherCam*.

L'expérience CREAM a mis en évidence une abondance d'éléments de très haute énergie (au-dessus de 200 gigaélectronvolts par nucléon) plus importante que celle prévue par les modèles fondés sur des mécanismes standards de formation de ces rayons cosmiques et leur propagation. Ce résultat a été confirmé par d'autres expériences et a conduit à la mise au point de nouvelles expériences pour comprendre les mécanismes qui accélèrent ces particules.

Laurent Derome
LPSC, Grenoble

Des ballons pour explorer les planètes ?

En 1985, deux ballons pressurisés, apportés par les sondes spatiales Vega, ont voyagé dans l'atmosphère de Vénus pendant deux jours à 50 kilomètres de la surface. Tous les corps dotés d'une atmosphère (Mars, Titan, etc.) pourraient être explorés, sur de vastes régions, par des ballons, qui présentent l'avantage d'une grande mobilité par rapport à un véhicule au sol. Cependant, les conditions sont beaucoup plus hostiles que sur Terre avec, par exemple, des nuages d'acide sulfurique sur Vénus et des températures qui peuvent descendre à -170°C sur Titan.

de la masse totale du ballon) à prévoir au départ pour un cycle de 24 heures. Il y a donc un compromis à faire entre la durée du vol et la masse à emporter.

Une façon de s'affranchir du cycle jour-nuit est d'effectuer des vols lors des nuits polaires qui durent plusieurs mois. Le ballon peut voler plusieurs semaines à une altitude constante. L'autonomie du ballon est alors limitée par les réserves d'énergie des batteries qui alimentent les instruments ou encore la perte, par diffusion, du gaz de l'enveloppe.

Une solution consisterait à utiliser des ballons dits pressurisés dont l'enveloppe est fermée. Ils volent pendant plusieurs mois, mais finissent malgré tout par perdre de l'hélium en raison de la porosité, même minime, de l'enveloppe. En outre, il est aujourd'hui inenvisageable de concevoir des ballons fermés aussi grands que les ballons ouverts. Les ballons pressurisés du CNES, dont le diamètre est compris entre 8 et 12 mètres, atteignent au maximum 20 kilomètres d'altitude pour une charge utile d'environ 50 kilogrammes (ce qui est insuffisant pour les appareils d'observation utilisés en astrophysique).

Enfin, les montgolfières dites infrarouges, développées par le CNES dans les années 1970, sont aussi capables de réaliser des vols de longue durée. Elles ont une enveloppe ouverte contenant un peu d'hélium pour décoller, qui est ensuite remplacé par de l'air. Elles fonctionnent à deux altitudes : 20 kilomètres la nuit et 30 le jour. La partie supérieure du ballon est

recouverte d'une couche d'aluminium, qui permet au rayonnement solaire de réchauffer l'air dans le ballon le jour. La nuit, la Terre émet un rayonnement infrarouge qui limite son refroidissement et maintient le ballon à son altitude de vol basse. Là encore, la charge ne peut actuellement pas excéder 60 kilogrammes.

Retour sur Terre

L'équipe de pilotage désignera le site d'atterrissage le plus favorable en fonction de la trajectoire du ballon, des données météorologiques, de la configuration du sol et des conditions drastiques de sauvegarde. Les éléments de la chaîne de vol seront récupérés, et notamment la nacelle emportant l'instrument. Les équipes scientifiques commenceront alors à dépouiller les données.

Les ballons sont des véhicules efficaces pour effectuer des observations en astrophysique et en cosmologie : la conception ne prend que quelques années, la bonne maîtrise des opérations de lâcher et leur fiabilité pour des coûts réduits en sont quelques atouts. Le développement d'aérostats capables de voler plusieurs jours, voire quelques semaines, ou de transporter des instruments de plus en plus lourds, est un enjeu majeur pour les futures missions. L'amélioration des performances des ballons stratosphériques ouverts, mais aussi des ballons pressurisés et des montgolfières infrarouges, est à l'étude pour mieux répondre aux contraintes des expériences volant dans la stratosphère. ■

Parlons-en !

Les grands débats

proposés par le CNRS

en partenariat avec le musée du quai Branly



L'imagerie cérébrale dévoilera-t-elle un jour nos pensées ?

Jeudi 20 septembre 2012 à 19 heures

Suivez le débat en ligne dès 19 heures
sur www.20minutes.fr

Salon de lecture Jacques Kerchache, musée du quai Branly

Entrée libre. Informations sur www.cnrs.fr/lesgrandsdebats



www.cnrs.fr

★ musée du quai Branly
LÀ OÙ DIALOGUENT LES CULTURES



POUR LA SCIENCE



Paléontologie

Les dinosaures

Scott Sampson

L'ESSENTIEL

- Il y a 90 à 70 millions d'années, un grand bras de mer recouvrait la partie centrale de l'Amérique du Nord, ce qui formait à l'Ouest un continent nommé Laramidia.
- Les découvertes récentes renforcent l'idée que deux faunes distinctes de dinosaures vivaient sur Laramidia, l'une au Sud et l'autre au Nord.
- Les nombreuses espèces de grande taille mises au jour sur un territoire limité laissent perplexes les paléontologues.

1. LE DÉJEUNER SUR L'HERBE :

un troupeau de dinosaures du genre *Kosmoceratops* broute parmi les cyprès. La scène se déroule il y a 76 millions d'années, dans un marécage primitif d'une région correspondant aujourd'hui au Sud de l'Utah, aux États-Unis.

du continent perdu

Des faunes distinctes de dinosaures semblent avoir vécu sur l'ancien continent de Laramidia, en Amérique du Nord.

Comment ont-elles coexisté sans se mélanger ?

Et comment une terre aussi petite a-t-elle pu nourrir autant d'espèces de grande taille ?



En ce matin de septembre 2010, mon équipe et moi progressons en file indienne sur une crête de grès et de schistes argileux (voir la figure 2). Du haut de cette colline du parc naturel de Grand Staircase-Escalante, au Sud de l'Utah, nous apercevons le site en cours de fouille. Il est parsemé de blocs de plâtres contenant des fossiles déjà prélevés. D'une blancheur éclatante, ils tranchent au milieu du paysage aride et gris des Badlands. Certains ont la taille d'une miche de pain tandis que d'autres, longs de trois mètres, pèsent plus d'une tonne. Mais tous contiennent des restes osseux d'animaux ayant vécu en ce lieu il y a 76 millions d'années.

En seulement deux campagnes, nous avons découvert toute une variété d'espèces dans l'une des nombreuses carrières de la formation de Kaiparowits, riche en fossiles. Un squelette assez complet de l'imposant *Gryposaurus* fait grosse impression; la taille de ce dinosaure herbivore de la famille des hadrosauridés (ou dinosaures à becs de canard) était comparable à celle des fameux tyrannosaures...

Mon équipe est sous pression : il faut terminer les fouilles avant le transfert des fossiles par hélicoptère vers le camion qui les acheminera en quelques jours jusqu'au Muséum d'histoire naturelle de l'Utah à Salt Lake City. Là, avec d'innombrables précautions, des bénévoles formés dégageront les fossiles du plâtre et mettront en ordre les os pour reconstituer les squelettes. Des mois de travail en perspective!

M'arrêtant sur une corniche de grès pour m'imprégner du paysage, je m'imaginais pour la énième fois l'aspect de cette région à l'époque des dinosaures. Couverte de zones humides, elle était traversée par des rivières nées des montagnes situées à l'Ouest, qui serpentaient à travers un paysage verdoyant parsemé d'étangs et de lacs. Tandis que ses zones marécageuses étaient envahies par les cyprès (voir la figure 1), les terrains assez secs et stables étaient couverts de forêts de conifères et d'arbres en fleurs couverts de plantes grimpantes. Partout, le bourdonnement des insectes emplissait un air humide.

Un tel paysage n'est pas sans rappeler les marécages actuels du Nord de la Louisiane. Encore faut-il y incorporer une bonne dizaine d'espèces de dinosaures, notamment des hadrosaures (herbivores à bec de canard), des cératopsidés (dino-



Rick Wicker, Denver Museum of Nature and Science

saures cornus), des droméosaures munis de griffes en forme de faucille, et même un type de tyrannosaure.

Nous fouillons cette région reculée depuis dix ans, de sorte que nous commençons à nous faire une idée des populations de dinosaures qui y vivaient au Campanien (il y a 83,5 à 70,6 millions d'années). Sans doute est-ce durant cette époque de la fin du Crétacé supérieur que les dinosaures se sont le plus épanouis dans la région. En un sens, l'assemblage fossile de Kaiparowits n'a rien d'extraordinaire, puisqu'il représente les mêmes grands groupes de dinosaures que ceux déjà observés dans les couches sédimentaires campaniennes du Montana, aux États-Unis, ou de l'Alberta, au Canada.

Laramidia : une faune du Sud et une faune du Nord

Pourtant, le plateau de Kaiparowits fait apparaître des espèces particulières d'un intérêt unique, dont beaucoup étaient de grande taille, ce qui nous incite à reconsidérer une bonne partie de ce que l'on pensait savoir sur l'évolution des dinosaures et sur leur écologie. Expliquons cela.

Au Crétacé supérieur, la Terre était une serre. Alors que les régions polaires étaient dépourvues de calottes glaciaires, le niveau des océans était très élevé. À tel point qu'une mer chaude et salée reliait l'océan

Arctique et le golfe du Mexique : la *Western Interior Seaway* (voie maritime intérieure de l'Ouest). Cette mer divisait l'Amérique du Nord en deux parties : Appalachia à l'Est et Laramidia à l'Ouest (voir l'encadré page 57). Les dinosaures, les plantes et autres organismes que nous retrouvons sur le plateau de Kaiparowits vivaient sur Laramidia, terre qui représente moins du cinquième de son continent d'origine.

Au début des années 1960, les chasseurs de fossiles œuvrant dans la région intérieure occidentale de l'Amérique du Nord ont commencé à remarquer que les dinosaures de la fin du Crétacé retrouvés dans le Montana et l'Alberta appartenaient à des espèces différentes de celles qui avaient été extraites de couches géologiques d'âge similaire plus au Sud, comme au Nouveau-Mexique ou au Texas.

Dans les années 1980, Thomas Lehman, de l'Université technologique du Texas, a cartographié les lieux où avaient été mis au jour des dinosaures et d'autres vertébrés sur Laramidia. Il a ainsi trouvé des signes de l'existence de groupes distincts d'espèces au Nord et au Sud au cours des 15 derniers millions d'années du Crétacé, dont fait partie l'étage campanien. Faute d'indication sur l'existence d'une barrière physique à une dispersion Nord-Sud des espèces, Th. Lehman a émis l'hypothèse qu'une forte dépendance du climat sur la latitude aurait produit des flores et faunes distinctes, dont des dinosaures géants.



2. DES MEMBRES DE L'ÉQUIPE de l'auteur gravissent une crête dans les terrains ravinés de la formation de Kaiparowits [Utah, États-Unis] (a). C'est dans cette région qu'ils ont découvert les restes de nombreuses nouvelles espèces de dinosaures. Les fossiles mis au jour, dont une

tête de *Kosmocerotops* (b), ont été transportés au Muséum de l'Utah, où des bénévoles les ont dégagés et nettoyés afin de les reconstituer. Parmi les espèces exhumées dans cette zone figure un autre dinosaure à cornes, *Utahceratops* (c).

Les paléontologues étaient sceptiques. Comment imaginer que de multiples populations de dinosaures aient cohabité sur cette petite île-continent de Laramidia, et que tant d'espèces géantes aient pu se partager un territoire si restreint ?

Les critiques à l'égard de l'hypothèse de Th. Lehman soulignaient que le provincialisme apparent peut résulter d'un échantillonnage inégal des fossiles à travers le temps. Comme le Crétacé s'étend sur des millions d'années, les paléontologues travaillant à différentes latitudes dans cette région ont peut-être échantillonné des périodes distinctes. Dans ce cas, on aurait l'impression de faunes contemporaines différentes, même si une seule et même faune de dinosaures existait sur Laramidia à un moment géologique donné.

Trop de lacunes dans le registre fossile ?

Par ailleurs, firent observer les sceptiques, la disparité apparente de faunes pourrait être due à un échantillonnage géographiquement insuffisant. Il y a peu de temps encore, la grande majorité des dinosaures de Laramidia étaient retrouvés au Nord, en particulier dans l'Alberta et le Montana. Un échantillonnage plus approfondi dans le Sud de Laramidia finirait peut-être par révéler une communauté unique, largement disséminée. Ces questions demeuraient sans réponse en 2000, lors-

que nous avons entamé nos travaux dans le Sud de l'Utah.

Les fossiles que nous avons mis au jour dans le parc de Grand Staircase-Escalante permettent en grande partie de combler ce manque d'informations sur les communautés de dinosaures qui peuplaient le Sud de Laramidia, et d'appuyer la thèse de Th. Lehman. Leur datation a été une étape essentielle pour répondre à la question de l'éventuelle existence simultanée de faunes distinctes dans le Nord et le Sud.

Le géologue de l'équipe, Eric Roberts, de l'Université James Cook en Australie, a trouvé des couches de cendres volcaniques disséminées sur toutes les strates rocheuses du plateau de Kaiparowits. Il les a datées au moyen de techniques radiométriques. Les résultats ont montré que la zone clef, riche en fossiles, s'était formée sur une période d'un million d'années, il y a 76,5 à 75,5 millions d'années. La comparaison de ces datations de cendres avec celles d'autres formations laramidiennes a révélé que la formation de Kaiparowits coïncidait précisément dans le temps avec celle de Dinosaur Park dans l'Alberta. Nous détenons désormais la preuve qu'au moins deux assemblages fossiles, l'un au Sud, l'autre au Nord, correspondaient à des dinosaures contemporains.

L'étape suivante consistait à déterminer si les dinosaures eux-mêmes différaient du Nord au Sud. Sur les 15 types de dinosaures exhumés jusqu'ici par

■ L'AUTEUR



Scott SAMPSON, paléontologue spécialiste des dinosaures, est conservateur au Muséum

d'histoire naturelle de l'Utah, aux États-Unis.

■ SUR LE WEB

Comment le paléo-artiste J. Gurney a créé les images de dinosaures présentées dans cet article :

ScientificAmerican.com/mar2012/dinosaurs

l'équipe, et correspondant à cet intervalle d'un million d'années, une dizaine sont suffisamment complets pour que les espèces soient identifiables. Un seul – un hadrosaure du genre *Gryposaurus* (voir la figure 3) – a pu être présent plus au Nord. Cette espèce ressemble beaucoup à *G. notabilis* de l'Alberta ; mais cette identification reste à confirmer.

Mis à part ce point, la situation semble s'éclaircir : toutes les autres espèces de dinosaures identifiées jusqu'ici sur le plateau de Kaiparowits diffèrent de celles trouvées plus au Nord. Lorsque des carnivores de petite taille ou de taille moyenne tels que l'oviraptosaure *Hagryphus* et le troödon *Talos* rôdaient sur l'ancien territoire de l'Utah, les mêmes groupes étaient représentés plus au Nord, dans l'Alberta, par *Chirostenotes* et *Troödon*. De même, alors que *Teratophoneus*, un tyrannosaure de grande taille mais à petite tête (voir la figure 3), était le plus gros carnivore terrestre de l'Utah, d'autres tyrannosaures tels que *Gorgosaurus* jouaient ce rôle dans le Nord.

Les dinosaures herbivores de la formation de Kaiparowits sont tout aussi différents de leurs congénères plus septentrionaux. L'un d'eux, *Parasaurolophus*, est un curieux hadrosaure muni d'une longue crête tubulaire sur la tête. Trois espèces de *Parasaurolophus* avaient été découvertes antérieurement, l'une dans l'Alberta et deux autres au Nouveau-Mexique. Celle exhumée dans l'Utah semble nouvelle pour la science.

Une disparité Nord-Sud qui se confirme

Le schéma se répète chez les cératopsidés. Nous en avons récemment découvert un que nous avons nommé *Utahceratops*. Son crâne est orné d'une collerette mesurant presque deux mètres de long. Un deuxième genre, *Kosmoceratops*, a une collerette plus courte, mais son crâne porte une série de 15 cornes, un record chez les dinosaures (voir les figures 1 et 2). Alors qu'*Utahceratops*, *Kosmoceratops* et un troisième (non encore nommé) se nourrissaient de végétaux dans l'Utah, d'autres espèces à cornes mastiquaient des plantes plus au Nord.

L'assemblage fossile découvert récemment sur le plateau de Kaiparowits fournit la preuve la plus convaincante jusqu'ici de l'existence, sur Laramidia, d'encla-

ves isolées de dinosaures. Bien que les mêmes principaux groupes aient existé au Nord et au Sud, les espèces différaient entre les deux régions. Aucune des plus de 50 espèces de dinosaures du Campanien, issues de diverses formations géologiques, ne peut encore être attribuée à la fois au Nord et au Sud. Ces découvertes vont bien sûr à l'encontre de l'idée que les différences d'espèces entre le Nord et le Sud résulteraient d'un échantillonnage incomplet tant du point de vue temporel que géographique. Nous devons au contraire nous faire à l'idée qu'au moins deux communautés de dinosaures ont cohabité sur cette île-continent pendant au moins un million d'années à la fin du Campanien.

Beaucoup de géants sur un petit territoire

Le fait qu'un grand nombre de ces dinosaures aient été des géants épaissit le mystère de Laramidia. Des études sur les mammifères terrestres modernes indiquent un lien étroit entre la taille corporelle maximale et la superficie du territoire. Les grands animaux tendent à occuper une étendue plus vaste afin de trouver assez de nourriture. Leur densité de population est alors plus faible. Les espèces de grande taille nécessitent donc un compromis : une densité de population suffisamment basse pour ne pas épuiser les ressources alimentaires, mais suffisamment élevée pour permettre la reproduction.

Enfin, la taille des grands vertébrés et leur diversité en espèces sont limitées par la conjonction d'un certain nombre de conditions physiologiques (besoin métabolique accru en matière d'alimentation), écologiques (disponibilité de la nourriture) et territoriales (des superficies plus grandes pouvant accueillir davantage d'espèces de grande taille). Cette équation devient plus difficile encore à satisfaire pour les grands carnivores, obligés de vivre sur des territoires plus vastes que les herbivores puisque seule une petite fraction du bilan énergétique total d'un écosystème atteint le sommet de la chaîne alimentaire.

En théorie, les dinosaures géants auraient dû suivre un schéma similaire à celui des grands mammifères terrestres d'aujourd'hui. Ils auraient donc dû être rares sur l'île-continent de Laramidia. Or à elles deux, les communautés ani-

■ BIBLIOGRAPHIE

S. D. Sampson *et al.*, *New horned dinosaurs from Utah provide evidence for intracontinental dinosaur endemism*, *PLoS ONE*, vol. 5(9), e12292, 2010.

B. K. McNab, *Resources and energetics determined dinosaur maximal size*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106(29), pp. 12184-12188, 2009.

S. D. Sampson, *Dinosaur Odyssey : Fossil Threads in the Web of Life*, University of California Press, 2009.

G. P. Burness, J. Diamond et T. Flannery, *Dinosaurs, dragons, and dwarfs : The evolution of maximal body size*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 98(25), pp. 14518-14523, 2001.

males représentées dans la formation de Kaiparowits et dans celle de Dinosaur Park comprennent au moins 17 à 20 espèces contemporaines de dinosaures géants – c'est-à-dire dépassant une tonne à l'âge adulte –, dont la plupart pèsent plus de deux tonnes.

Selon nos critères actuels, ce scénario semble improbable. Aujourd'hui, le seul endroit sur Terre où abondent des animaux géants est l'Afrique, qui abrite six mam-

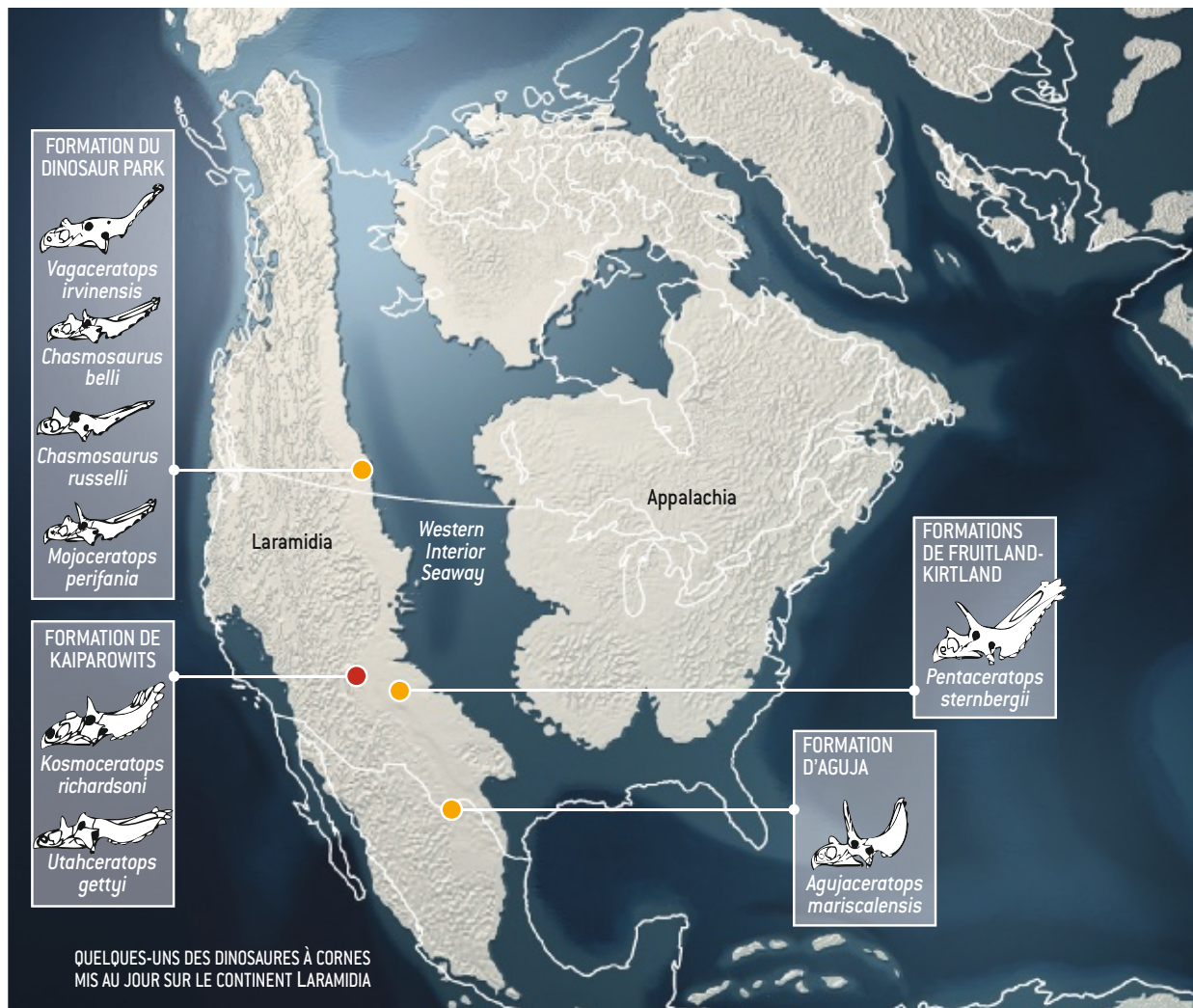
mifères dont le poids moyen excède la tonne. Ce sont tous des herbivores : la girafe, l'hippopotame (qui passe le plus clair de son temps dans l'eau douce plutôt qu'à terre), deux espèces d'éléphant et deux de rhinocéros.

Il est vrai que, par le passé, un nombre beaucoup plus grand d'espèces terrestres de grande taille vivaient en Afrique et sur d'autres blocs continentaux. Par exemple, au début du Pléistocène, il y a

DIVERSITÉ DINOSAURIENNE

Au cours du Crétacé supérieur, il y a entre 90 et 70 millions d'années, un vaste bras de mer a isolé la partie Ouest de ce qui est aujourd'hui l'Amérique du Nord. Cette bande de terre formait ainsi un continent appelé Laramidia. Les paléontologues ont constaté que les régions septentrionales et méridionales de ce bloc semblent avoir été habitées par des communautés animales différentes. Selon certains chercheurs sceptiques, il pourrait s'agir d'un biais dans le registre fossile : les découvertes de fossiles seraient inégalement

réparties dans l'espace et le temps. Cependant, des fouilles dans la formation géologique de Grand Staircase-Escalante ont révélé un nombre plus grand encore d'espèces qui restent inconnues dans les zones géologiques du même âge situées plus au Nord. Cette découverte conforte la théorie d'enclaves distinctes de dinosaures au Nord et au Sud de Laramidia. A-t-il existé une barrière climatique ou physique qui aurait séparé les dinosaures du Sud de leurs congénères du Nord ? La question reste pour l'heure sans réponse.



George Ralsback, Ron Blakey, Northern Arizona University



James Gurney

3. TERATOPHONEUS, UNE SORTE DE TYRANOSAURE, vient de mettre à terre un hadrosaure à bec de canard du genre *Gryposaurus*. Des restes de ces deux types de dinosaures ont été retrouvés dans le parc de Grand Staircase-Escalante (Sud de l'Utah), dans des dépôts sédimentaires datant d'environ 76 millions d'années.

entre 2,5 et 2 millions d'années, quelque 16 très grands mammifères herbivores vivaient en Afrique : plusieurs sortes de girafes, d'éléphants, d'hippopotames et de rhinocéros, et plusieurs types d'antilopes géantes pesant près d'une tonne. Néanmoins, un certain nombre de signes indiquent que le cas des dinosaures de Laramidia est assez exceptionnel.

Premièrement, la superficie de l'île-continent de Laramidia représentait moins d'un cinquième de l'Afrique au Pléistocène. Ses 17 à 20 dinosaures géants étaient donc confinés sur un territoire beaucoup plus petit que celui des mammifères mastodontes africains. En outre, il existe de multiples preuves – notamment grâce aux accumulations d'ossements – que, chaque année, de nombreuses espèces de hadrosaures et de Cératopsidés se regroupaient pour former des troupeaux de centaines (voire de milliers) d'animaux.

LE NOMBRE TOTAL DE DINOSAURES GÉANTS ayant vécu au même moment sur l'île-continent de Laramidia a pu dépasser de beaucoup les 20 espèces.

Deuxièmement, à partir du Pléistocène, les écosystèmes dominés par les mammifères présentent peu de carnivores terrestres approchant la tonne. En effet, l'évolution des mammifères terrestres n'a pas engendré jusqu'ici de carnivores approchant l'envergure d'un tyrannosaure. Le lion, le plus grand prédateur d'Afrique, pèse en général moins de 300 kilogrammes. Laramidia, en revanche, hébergeait au moins trois tyrannosaures géants, dont le poids dépassait semble-t-il la tonne.

Troisièmement, alors que les paléontologues ont découvert des fossiles datant du Pléistocène infé-

rieur dans de nombreux pays d'Afrique, les échantillons disponibles pour Laramidia se limitent à deux formations géologiques du même âge. Puisqu'il semble que les dinosaures de Laramidia avaient des aires de répartition très restreintes (comparées aux mammifères terrestres modernes), avec un minimum de chevauchements entre les peuplements de la même époque, il est fort probable que d'autres dinosaures aient peuplé cette île-continent pendant le Campanien. Dans ce cas, le nombre total de dinosaures géants ayant vécu au même moment sur Laramidia a pu dépasser de beaucoup les 20 espèces.

En bref, nos découvertes sur le plateau de Kaiparowits suggèrent fortement que la richesse en espèces de dinosaures de grande taille dépassait celle que l'on connaît sur les grands mammifères.

Cette comparaison entre les grands mammifères africains et les dinosaures géants de Laramidia nous ramène à la question soulevée par l'hypothèse de Th. Lehman, à savoir comment une telle variété de dinosaures géants a pu occuper un si petit territoire. Il reste deux principales possibilités : soit ces dinosaures se contentaient de moins de nourriture que les grands animaux d'aujourd'hui, soit la production végétale était beaucoup plus importante.

Dinosaures sobres ou végétation très abondante ?

Les scientifiques s'interrogent depuis longtemps sur le métabolisme des dinosaures : était-il semblable à celui d'un animal ectotherme, à sang froid (comme les amphibiens et les reptiles) ou à celui d'un animal endotherme, à sang chaud (comme les oiseaux ou les mammifères) ? Si leur métabolisme était intermédiaire entre ceux de ces deux groupes, leurs besoins énergétiques auraient été réduits, ce qui aiderait à expliquer comment tant d'espèces géantes ont pu cohabiter sur une zone aussi réduite que celle de Laramidia.

Des travaux de Brian McNab, de l'Université de Floride, appuient cette hypothèse de dinosaures à métabolisme intermédiaire. En 2009, B. McNab a dégagé un certain nombre d'indices suggérant que des besoins énergétiques assez faibles ont rendu possible l'existence de communautés de dinosaures pesant jusqu'à cinq fois plus que les grands mammifères herbivores de l'Afrique actuelle.

L'autre possibilité est que, en comparaison avec les écosystèmes actuels, les plantes du Crétacé supérieur aient offert aux grands herbivores une alimentation plus abondante ou plus nourrissante, ou les deux à la fois. La diversité et l'abondance des végétaux dépendent de facteurs tels que les précipitations, la température, la durée de la saison de croissance végétale et la disponibilité de niches écologiques.

Aujourd'hui, les zones les plus luxuriantes, en diversité comme en biomasse de végétaux, sont

plutôt les régions tropicales. Ce n'était pas forcément le cas au Crétacé supérieur, où l'effet de serre et les températures élevées ont pu limiter la diversité animale et végétale au niveau des tropiques.

En revanche, aux latitudes moyennes, qui concernent la plus grande partie de l'île-continent de Laramidia, le climat était doux et la saison de croissance végétale longue. À l'Ouest, les chaînes de montagnes et les rivières multipliaient le nombre de niches écologiques disponibles. À l'Est, la voie maritime intérieure exerçait son influence bénéfique sur les températures, tout en étant source de plus grandes précipitations. Les paléobotanistes Ian Miller et Kirk Johnson, du Musée de la nature et de la science de Denver, ont déjà retrouvé une centaine de variétés de plantes différentes dans les couches géologiques du plateau de Kaiparowits. Bien qu'il reste beaucoup à explorer, tout semble indiquer que les communautés de dinosaures de Laramidia bénéficiaient d'une végétation abondante et diversifiée.

Une diversité peut-être bien plus importante

D'autres travaux de recherche seront nécessaires pour établir si un métabolisme plus lent ou une plus grande disponibilité de la nourriture ont permis aux dinosaures d'atteindre de si grandes tailles et une telle diversité d'espèces. Ces facteurs sont peut-être tous deux impliqués. Une chose est certaine : le monde des dinosaures soumis au climat très chaud qui a caractérisé le Crétacé était bien différent de notre environnement actuel.

Nos travaux sur la formation de Kaiparowits suscitent autant de questions que de réponses, comme toute autre recherche scientifique digne de ce nom. Par exemple, combien de communautés distinctes de dinosaures ont coexisté sur le continent perdu de Laramidia ? Une autre question importante porte sur la nature de la barrière qui séparait les communautés du Nord de celles du Sud. Cette frontière était-elle uniquement climatique, comme on le pensait initialement ? Certains géologues soupçonnent aujourd'hui qu'il existait une barrière plus tangible, constituée peut-être de fleuves descendus des montagnes et allant se jeter dans la mer au niveau du Nord de l'Utah et du Colorado.

Une conséquence intrigante est à souligner. S'il s'avérait que les aires de répartition des espèces de dinosaures étaient beaucoup plus restreintes que ne le sont celles des mammifères de taille équivalente, la diversité des dinosaures devait être bien plus importante qu'on ne le pensait, puisqu'il devait alors y avoir des communautés différentes de dinosaures dans les régions non encore explorées. Autrement dit, sur Laramidia, un grand nombre d'étranges et merveilleuses créatures sont toujours sous terre, attendant que l'on veuille bien venir les exhumer. ■



Muséum national d'Histoire naturelle

Écologie acoustique



des chiroptères d'Europe

Identification des espèces, études de leurs habitats et comportements de chasse

Michel Barataud

Animaux nocturnes, les chiroptères ont développé un système de repérage dans l'espace du type sonar. Inaudibles à l'oreille humaine, les cris des chauves-souris peuvent être perçus, enregistrés et analysés grâce à différents appareils et logiciels.

Cet ouvrage dresse le bilan des connaissances acquises par l'auteur depuis plus de vingt ans en matière de détection ultrasonore. Aux premières approches, purement auditives, il ajoute une autre dimension : l'identification par l'analyse informatique des ultrasons. Grâce aux détecteurs de plus en plus performants et à l'analyse informatique, la méthode décrite permet d'identifier en Europe environ 85 % des contacts acoustiques, de mener des inventaires et d'entreprendre des études toujours plus fines sans perturber les animaux. Ce livre traite 33 des 42 espèces de chauves-souris européennes.

DVD en supplément

Vous y trouverez les échantillons sonores illustrant la méthode ainsi que les fichiers (graphiques) nécessaires à l'identification des espèces.



ISBN : 978-2-85653-685-8
format 170 x 245 mm • impression quadri
nombreuses photos • DVD • 344p. • 49,90 € TTC

ouvrage en vente dans la librairie des Publications Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

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>

Microalgues : ? les carburants du futur

Philip Pienkos, Lieve Laurens et Andy Aden

Les algues microscopiques pourraient fournir presque autant de biocarburants que les plantes terrestres. Il reste à les rendre compétitives avec les carburants fossiles.



Le développement d'alternatives aux combustibles fossiles est en plein essor. Dans le futur, les véhicules ne fonctionneront plus uniquement à l'essence ou au diesel usuels, mais aussi aux biocarburants liquides, à l'électricité et peut-être à l'hydrogène. Presque toute l'essence distribuée aux États-Unis contient déjà dix pour cent d'éthanol, essentiellement fabriqué à partir de maïs. En France, selon l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), les biocarburants ont fourni 5,71 pour cent (en valeur énergétique) de la consommation totale de carburants en 2008. À l'échelle mondiale, 75 millions de tonnes de biocarburants ont été produits en 2010, à comparer aux 1 700 millions de tonnes de carburants pétroliers consommés annuellement.

Selon les chercheurs, de multiples types de biomasse seront nécessaires pour assurer un approvisionnement suffisant. Un rapport américain actualisé en 2011 indique qu'on pourrait extraire aux États-Unis jusqu'à 1,6 milliard de tonnes de biomasse terrestre par an, tout en respectant l'environnement, à partir de diverses sources : les déchets

de l'agriculture et de la sylviculture, les ordures ménagères, ainsi que des plantes spécifiques, telles les graminées *Miscanthus* et *Panicum virgatum* (en anglais *switchgrass*, le terme français panic raide étant peu utilisé). La biomasse servirait au chauffage et à la fabrication de biocarburants et de divers autres produits. Le rapport établit aussi la production maximale théorique de substituts à l'essence fondés sur cette biomasse : près de 363 milliards de litres. Les États-Unis consommant environ 756 milliards de litres par an de carburants liquides dérivés du pétrole brut, la biomasse terrestre ne suffira pas. Il faut donc prospecter ailleurs.

Les algues présentent de nombreux avantages. Certaines espèces ont une teneur élevée en lipides, exploitables pour un type de biocarburant nommé biodiesel. La quantité d'algues cultivable par hectare est importante. La production de biocarburant entre moins en compétition avec les usages alimentaires que ne le font des cultures telles que le maïs. Les algues poussent dans des environnements divers et sont cultivables sur des surfaces impropres à l'agriculture.

Différents types d'eau sont utilisables : douce, saumâtre, salée et même des eaux usées. On pense que les carburants extraits d'algues dégageraient bien moins de gaz à effet de serre que les combustibles fossiles – cela reste toutefois à confirmer. Enfin, outre les biocarburants, d'autres produits commercialement intéressants pourraient être développés à partir des algues.

Dans une étude publiée en 2011, Mark Wigmosta, du Département de l'énergie américain, et ses collègues ont évalué la quantité de terres et de ressources (en eau, en dioxyde de carbone et en nutriments minéraux) disponibles pour la culture des algues. Ils en ont déduit la quantité potentielle de biocarburants susceptibles d'être produits aux États-Unis par cette filière : 216 milliards de litres par an, soit le même ordre de grandeur que l'ensemble des carburants tirés de la biomasse terrestre (363 milliards de litres). C'est d'autant plus intéressant que ce chiffre peut augmenter, car il se fonde sur les techniques actuelles, que l'on cherche à améliorer.

Des macroalgues trop chères

En effet, la filière des algues est confrontée à de multiples défis. Nous devons encore identifier les souches d'algues à forte productivité, mettre au point des méthodes fiables et peu exigeantes en eau pour les cultiver, et inventer des systèmes efficaces d'extraction des lipides et des autres produits d'intérêt commercial. Le coût de ces techniques ne devra pas être trop élevé, pour que le carburant extrait des algues soit compétitif avec ceux dérivés du pétrole.

Précisons que les algues qui nous intéressent pour les biocarburants sont les microalgues, des micro-organismes photosynthétiques unicellulaires. Le potentiel des macroalgues a aussi été étudié, mais l'idée de les utiliser a été abandonnée en raison de coûts prohibitifs liés à leur récolte

1. LES PHOTOBIOREACTEURS sont des récipients fermés dans lesquels on cultive des microalgues. Comme les autres systèmes de culture à l'étude, ils sont encore trop coûteux pour alimenter une filière de biocarburants rentable.

L'ESSENTIEL

- Les microalgues abondent dans les eaux douces et salées. Certaines espèces sont riches en lipides, exploitables pour les biocarburants.
- Toutefois, les carburants qu'elles fournissent sont trop chers par rapport à ceux dérivés du pétrole.
- On tente de rendre la filière des microalgues compétitive grâce à plusieurs types d'actions : recherche de souches algales plus intéressantes, améliorations techniques à toutes les étapes (culture des algues, extraction des huiles...) et développement de coproduits commerciaux avec la biomasse résiduelle.

et à leur conversion en carburant. Ces plantes macroscopiques devraient donc rester cantonnées à leurs usages classiques, tels que les produits agroalimentaires : par exemple, on enveloppe les makis dans une algue nommée nori et on exploite les agars (des polysaccharides extraits des algues rouges) pour leurs propriétés gélifiantes.

Les microalgues sont omniprésentes dans la nature : on les trouve dans l'eau douce, l'eau de mer, les lacs hypersalés et même dans les écosystèmes désertiques et arctiques. Deux catégories principales de microalgues existent : les eucaryotes, qui possèdent des organites (noyau cellulaire, chloroplastes, mitochondries...), et les procaryotes (les cyanobactéries ou algues bleues), des bactéries photosynthétiques de structure cellulaire plus simple. On peut utiliser sur les cyanobactéries les nombreuses techniques d'ingénierie

génétique développées pour les bactéries, de sorte qu'elles sont intéressantes pour la recherche sur les biocarburants, mais elles ne fabriquent pas naturellement les huiles incorporables dans ces derniers. En revanche, les microalgues eucaryotes en synthétisent parfois en abondance.

Parmi les microalgues eucaryotes, les algues vertes, qualifiées d'oléagineuses, sont les plus riches en huiles : celles-ci peuvent représenter jusqu'à 60 pour cent de leur masse sèche cellulaire. Les algues vertes constituent un groupe d'espèces qui prospèrent dans une grande variété d'habitats et croissent rapidement.

La composition des lipides dépend notablement des espèces et des conditions dans lesquelles poussent les algues. Les lipides les plus intéressants pour les biocarburants sont ceux dits neutres, constitués de triglycérides, aussi nommés triacylglycérols ou

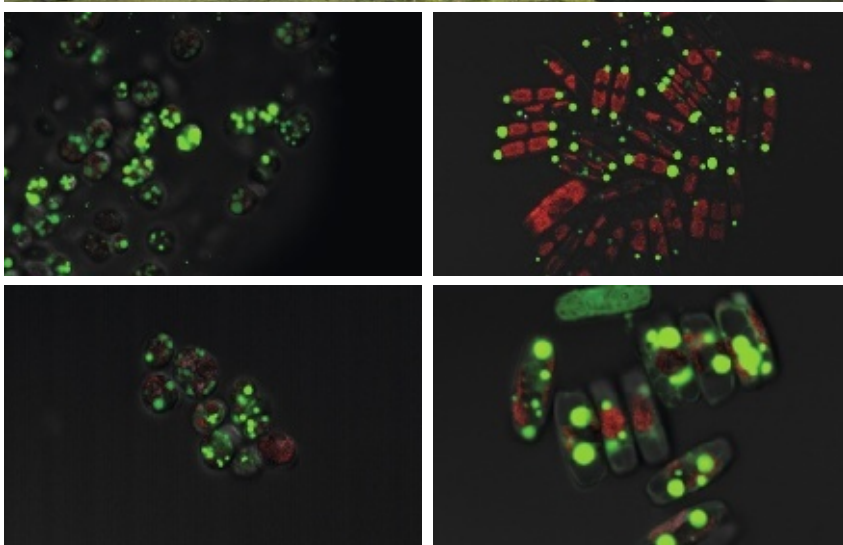
TAG : ces molécules sont formées de glycérol (une molécule dotée de trois groupes hydroxyle -OH), auquel sont associés par des liaisons dites ester trois acides gras de formule R-COOH, c'est-à-dire comprenant une chaîne carbonée R et un groupe acide carboxylique COOH (voir la figure 4). Les acides gras, qui constituent la partie du lipide utilisée dans les biocarburants, représentent presque la totalité de la masse des triglycérides : ceux-ci sont donc convertibles quasi intégralement en carburants. D'autres types de lipides ne comprennent qu'une ou deux molécules d'acides gras et des composants (sucres, groupes phosphates...) inutilisables pour les biocarburants : la fabrication de carburant à partir de ces lipides a donc un moins bon rendement.

Les algues stressées augmentent leurs réserves

Les acides gras sont synthétisés essentiellement dans les chloroplastes. De multiples enzymes interviennent dans cette synthèse, telle l'acétyl-CoA carboxylase (ACCase), qui joue un rôle clef dans la régulation des vitesses de réaction. Dans un environnement favorable, la photosynthèse produit beaucoup de biomasse et la plupart des acides gras fabriqués sont destinés aux lipides membranaires, tels les phospholipides et les glycolipides. Seuls 30 à 50 pour cent de ces lipides peuvent être convertis en carburant.

En revanche, quand les cellules subissent un stress métabolique, tel un manque de nutriments azotés, le métabolisme de la cellule est redirigé vers la production de composés de stockage, principalement des hydrates de carbone (des glucides) et des triglycérides. On obtient donc des lipides plus intéressants pour les biocarburants, mais la croissance et la division cellulaire sont ralenties. On cherche à mieux comprendre les mécanismes en jeu dans la régulation de la fabrication des triglycérides, afin de créer des algues qui en produiraient plus sans ralentir leur croissance.

On peut extraire l'huile de diverses façons, par exemple à l'aide de solvants organiques. Elle représente une fraction d'autant plus importante de la biomasse que, chez les microalgues, toutes les cellules fabriquent de l'huile – à l'inverse des plantes terrestres (soja, colza, palmier...),



© Lee Elliott, Colorado School of Mines/Dennis Schroeder/ National Renewable Energy Laboratory

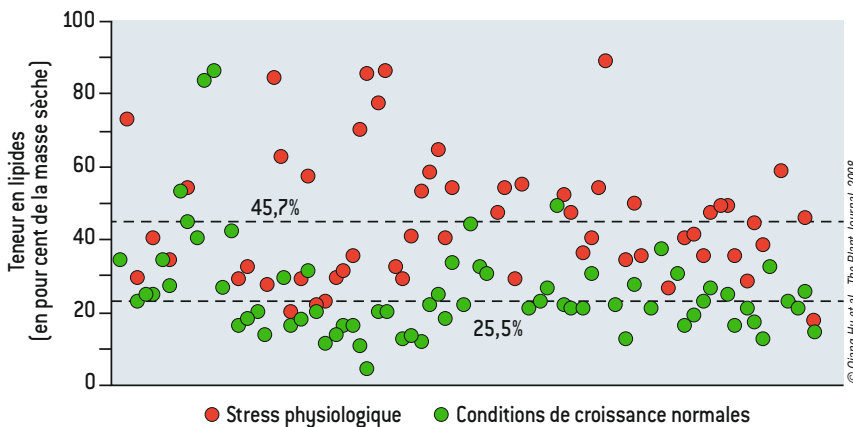
2. LA BIOPROSPECTION consiste à rechercher des algues naturelles aux caractéristiques intéressantes. Quatre espèces, prélevées dans le Sud-Ouest des États-Unis et vues au microscope, sont présentées ici. Les cellules ont été colorées avec du dipyrrométhène de bore (BODIPY), qui émet une fluorescence verte au contact de gouttelettes lipidiques. Il renseigne donc sur la teneur en lipides des cellules d'algues. La fluorescence rouge provient de la chlorophylle.

où seules des cellules spécialisées en produisent. Pour l'espèce *Chlorella vulgaris*, que nous avons particulièrement étudiée, la teneur en huile varie dans des proportions importantes : elle va de 10 à 50 pour cent de la biomasse, en fonction notamment de l'âge de la cellule et des conditions environnementales.

Comment transforme-t-on l'huile en biocarburant ? La première étape est une réaction chimique nommée transestérification, dans laquelle les acides gras sont détachés des triglycérides pour donner des alkyl-esters méthyliques ou éthyliques d'acides gras et du glycérol (voir la figure 4). Lors de la deuxième étape, le raffinage, on enlève du mélange les composants autres que les alkyl-esters d'acides gras (glycérol, lipides polaires, pigments résiduels...). On peut aussi effectuer des traitements similaires à ceux appliqués aux produits pétroliers, tel le craquage, qui consiste à scinder des molécules organiques complexes en éléments plus petits. Les carburants obtenus ressemblent à ceux dérivés du pétrole et peuvent leur être mélangés (en proportions variables selon les traitements subis) dans les infrastructures existantes.

Des coproduits pour rentabiliser la filière

Une fois les huiles algales extraites, par des solvants organiques ou d'une autre façon, la biomasse restante est constituée d'hydrates de carbone et de protéines en quantités approximativement égales. On cherche à s'en servir pour ce que l'on nomme des coproduits, afin d'optimiser économiquement la filière des algues. Les hydrates de carbone sont utilisables pour produire du méthane par digestion anaérobie (en mélangeant des micro-organismes à la biomasse) ou de l'éthanol par fermentation. Les protéines peuvent être exploitées pour l'alimentation du bétail, des poissons de pisciculture ou de l'homme. D'autres produits algaux de grande valeur, tels les acides gras oméga-3 (utilisables comme compléments alimentaires) et les antioxydants (nécessaires dans l'alimentation, afin de limiter l'endommagement oxydatif de certaines molécules, tel l'ADN), sont déjà disponibles dans le commerce, mais la demande est trop faible par rapport à celle de biocarburants ; ils ne peuvent donc rentabiliser la filière.



3. LES ALGUES VERTES sont celles qui produisent le plus de lipides, principalement sous forme de triglycérides, des molécules stockant le carbone et l'énergie (l'axe des abscisses correspond aux différentes espèces d'algues vertes). Elles sont dites oléagineuses, ce qui signifie que les lipides représentent au moins 20 pour cent de leur masse sèche. La production de lipides augmente quand les algues subissent un stress physiologique, tel un manque d'azote : la teneur moyenne des algues vertes en lipides est de 25,5 pour cent dans un environnement normal (points verts) contre 45,7 pour cent dans un environnement stressant (points rouges).

Aujourd'hui, le marché de la biomasse algale ne représente que quelques dizaines de milliers de tonnes par an. Des coproduits à haute valeur ajoutée bénéficiant d'un vaste marché restent à élaborer. C'est notamment l'objectif du projet français EIMA (Exploitation industrielle des microalgues).

Pour faire pousser des microalgues à grande échelle, nous devons développer un type d'agriculture inédit, centré sur des micro-organismes. De nouvelles méthodes de culture, de récolte et de traitement devront être élaborées. Quiconque possède une piscine mal entretenue peut confirmer que les algues croissent sans qu'on les y incite beaucoup, mais il reste à optimiser la vitesse de croissance et la densité de cellules dans le milieu de culture. En outre, il faut que les algues résistent aux prédateurs, tels les rotifères qui les broutent, et aux agents pathogènes (bactéries, champignons et virus). Enfin, elles doivent prospérer malgré la présence d'algues assimilables à de « mauvaises herbes » ; plus robustes que les souches productives, celles-ci ne sont d'aucune utilité pour les biocarburants.

De nombreuses recherches visent à maximiser la vitesse de croissance et la teneur en lipides des algues. Elles incluent la bioprospection, c'est-à-dire la traque de souches naturelles robustes dotées de ces caractéristiques et capables de prospérer sur un site de culture. Nous utilisons des techniques mises au point par les biotechnologies et les industries pharmaceutiques, notamment pour isoler des cellules algales

■ LES AUTEURS

Philip PIENKOS est biologiste moléculaire au Laboratoire américain des énergies renouvelables (NREL).

Lieve LAURENS est biochimiste au NREL.

Andy ADEN est ingénieur chimiste au NREL.

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

■ SUR LE WEB

Plate-forme européenne des biocarburants : www.biofuelstp.eu

uniques à partir de prélèvements environnementaux et tester leurs propriétés. En collaboration avec l'Université du Texas, nous avons développé des méthodes pour conserver des échantillons dormants par cryogénie et les « ressusciter » à volonté, ce qui nous dispense de renouvellements réguliers et fastidieux des milieux de culture.

Les techniques d'analyse doivent encore être améliorées, afin de passer rapidement au crible plusieurs centaines ou milliers de souches individuelles. Nous avons mis au point des méthodes à haut débit par

LA BIOPROSPECTION ET L'AMÉLIORATION génétique des souches algales naturelles sont deux des priorités des chercheurs.

spectroscopie infrarouge pour estimer la teneur en lipides des algues. Nous les avons appliquées à des centaines d'échantillons de biomasse algales provenant de plus de 80 espèces, dont la teneur en lipides variait de 10 à plus de 60 pour cent au cours de la croissance. Ces méthodes permettent en outre de distinguer les lipides neutres des autres lipides, ce qui est difficile avec les techniques usuelles.

La bioprospection et l'amélioration génétique des souches algales naturelles sont deux des priorités des chercheurs. Cette amélioration se fait de deux façons. La première consiste à recourir aux tech-

niques classiques, telles que l'accélération des mutations (grâce à des ultraviolets, des produits chimiques...), le criblage (on sélectionne les individus aux propriétés intéressantes dans une population) ou les croisements (certaines microalgues ont une reproduction sexuée). La seconde famille de méthodes est celle du génie génétique : on module par exemple le degré d'expression des gènes.

Des projets dits de biologie systémique sont aussi en cours : ils utilisent à la fois la génomique, la transcriptomique (l'étude des ARN messagers issus de la transcription du génome) et la protéomique (l'étude des protéines) pour comprendre les mécanismes moléculaires de la production des lipides. En France, des recherches de ce type sont notamment menées dans le cadre du projet ALGOMICS. Les informations récoltées par ces projets sont précieuses pour les expériences de génie génétique. Comme dans la bioprospection, on tente d'obtenir des algues faciles à exploiter et produisant plus de lipides sans diminuer leur croissance.

Outre *Chlorella vulgaris*, déjà mentionnée, d'autres algues eucaryotes sont étudiées, telles *Chlamydomonas reinhardtii* et différentes espèces de *Scenedesmus* et *Nannochloropsis*. *C. reinhardtii* produit peu d'huile, mais est l'algue eucaryote la mieux connue, et donc

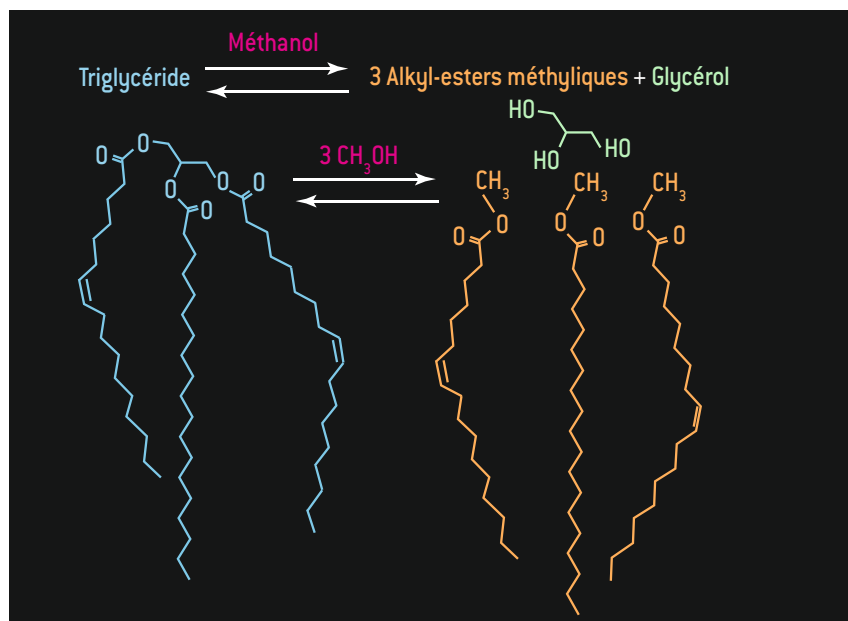
la plus facile à exploiter pour les recherches : son génome a été entièrement séquencé et de nombreux outils de manipulation génétique sont disponibles. Quant aux espèces de *Scenedesmus* et *Nannochloropsis*, elles se développent bien dans les systèmes de culture à grande échelle et produisent beaucoup d'huile.

Nos travaux en génie génétique concernent aussi la cyanobactérie *Synechocystis* PCC 6803. Bien que les cyanobactéries « naturelles » ne fabriquent pas de triglycérides, nous élaborons actuellement une espèce qui en est capable. Pour cela, nous réorientons le métabolisme de la cellule pour lui faire produire des acides gras plutôt que des hydrates de carbone, et nous lui insérons des gènes nécessaires à cette production.

Le génie génétique est controversé en raison des craintes de « contamination » du milieu naturel : des cultures à grande échelle pourraient favoriser la dispersion de souches modifiées, dont les gènes risqueraient de se propager à d'autres espèces. Quoi qu'il en soit, dans les laboratoires, des règles strictes sont en place pour éviter une libération accidentelle et les recherches en génie génétique sont essentielles pour estimer le potentiel d'une souche algale. Elles doivent être menées en parallèle avec des études sur des souches naturelles ou issues de la génétique classique, et inclure une évaluation des risques, afin de prendre toutes les précautions nécessaires pour une culture à grande échelle.

Un modèle de culture à trouver

Deux systèmes principaux ont été développés pour la culture des microalgues photosynthétiques : les bassins ouverts et les photobioréacteurs (des récipients fermés). Tous les dispositifs étudiés sont des variantes de ces deux systèmes. Certains bassins sont de conception simple : petits, d'une profondeur de 20 à 30 centimètres, ils n'ont pas de dispositif de brassage de l'eau. D'autres, plus élaborés, sont dotés de roues à aubes et leur géométrie est adaptée à la circulation de l'eau (voir la figure 5). Les bassins représentent le système le moins coûteux (en particulier ceux de conception simple), mais ils protègent peu contre les nuisibles, les prédateurs et les agents pathogènes de l'air. En outre, ils ont une faible surface par rapport à



4. LES TRIGLYCÉRIDES (*EN BLEU*) sont constitués de trois acides gras (les longues chaînes carbonées) liés à du glycérol par des liaisons dites ester. La trans-estérification consiste à les transformer en alkyl-esters méthyliques ou éthyliques (*en orange*) incorporables dans les biodiesels.

leur volume : dans les cultures denses, de nombreuses cellules algales risquent de rester à l'ombre (ce qui pénalise la photosynthèse), surtout s'il n'y a pas de dispositif de brassage.

Les photobioréacteurs fermés doivent être construits en matériaux qui laissent passer la lumière, tel le verre ou le plastique. Ils prennent diverses configurations : panneaux plats, tubes, voire simples sacs en plastique suspendus ou posés sur le sol. Dotés de rapports surface/volume plus élevés que les bassins, ils limitent les ombres sur les algues. Le récipient fermé empêche l'entrée d'organismes indésirables et réduit l'évaporation (et donc la quantité d'eau nécessaire pour une culture continue). Toutefois, l'alimentation en dioxyde de carbone et l'accumulation de chaleur et de dioxygène peuvent poser problème. En outre, ces systèmes sont bien plus coûteux que les bassins.

Pour les produits déjà commercialisés (compléments alimentaires, antioxydants), la plupart des entreprises de microalgues utilisent des bassins ouverts. Nos évaluations indiquent que ces derniers seront bien plus rentables que les photobioréacteurs pour les biocarburants, mais notre laboratoire n'a pas encore recommandé un système plutôt que l'autre. Chacun a des avantages et des inconvénients, et les deux sont encore trop coûteux pour produire des carburants économiquement compétitifs avec ceux dérivés du pétrole. Nous cherchons donc toujours à réduire les coûts et à identifier des coproduits à forte valeur ajoutée.

La culture des algues n'est qu'un des défis à surmonter : leur récolte et l'extraction des huiles en constituent deux autres. Même dans des conditions de culture optimales, on n'obtient qu'un ou deux grammes de biomasse par litre de culture – à comparer aux 100 grammes par litre atteints avec des souches bactériennes industrielles telle *Escherichia coli* (utilisée dans des processus de fermentation aérobie pour fabriquer divers produits pharmaceutiques). La densité des cellules algales doit alors être multipliée, parfois par 100, avant l'extraction des huiles. La centrifugation le permet facilement, mais elle nécessite des équipements chers et consomme beaucoup d'énergie. D'autres méthodes issues de l'industrie du traitement des eaux usées sont meilleur marché. C'est le cas de la floculation et de la flottation par air dissous. Lors de la floculation, on



5. DE MULTIPLES SYSTÈMES DE CULTURE D'ALGUES sont étudiés, tels des bassins ouverts (en blanc au milieu ; la roue à aubes, pointée par une flèche rouge, crée une circulation d'eau) et des récipients fermés nommés photobioréacteurs. Ces derniers sont par exemple tubulaires (à gauche) ou à panneaux plats (flèche bleue). Les couleurs proviennent de souches algales variées ou de conditions de culture différentes appliquées à une même souche.

fait s'agréger les cellules autour d'ions minéraux ou de polymères organiques – on exploite aussi parfois les propriétés de la paroi cellulaire des algues pour déclencher leur regroupement en masses compactes. Ces amas cellulaires se déposent ensuite au fond sous l'effet de la gravité, ou sont repoussés en surface grâce à l'injection d'air ou d'autres gaz dans le cas de la flottation par air dissous. Ces deux méthodes sont moins coûteuses que la centrifugation, mais elles sont moins efficaces pour concentrer les cellules et elles nécessitent des adaptations en fonction des souches algales et des conditions de culture.

Une fois la concentration adéquate obtenue, reste à extraire les lipides des cellules. Dans le cas des végétaux terrestres, il suffit de les presser pour récolter l'huile, mais les microalgues sont trop petites et solides pour que cette technique soit efficace. On utilise aussi des solvants du type de l'hexane avec certaines graines, tel le soja, mais ils traversent difficilement les parois cellulaires algales. Souvent, on doit d'abord rompre ces parois cellulaires pour rendre les lipides plus accessibles, grâce à des techniques comme la sonication (l'envoi d'ultrasons) ou le broyage mécanique. Ces étapes augmentent le coût global et les dépenses énergétiques, de sorte qu'on tente de les éliminer.

Si les lipides représentent le composant algal clef pour les biodiesel, les glucides et les protéines pourraient être utilisés pour d'autres produits énergétiques, tels

Comment calculer la production maximale ?

La production maximale théorique d'une région donnée est calculée en considérant une transformation totale de l'énergie solaire en biomasse algale. On admet généralement que c'est un objectif inatteignable. Les taux de production d'algues avec les techniques actuelles représentent en moyenne 3,5 pour cent de ce maximum théorique. Cet indice tend à suggérer que les régions très ensoleillées sont les plus favorables à la culture d'algues, mais les problèmes de gestion de l'eau devront alors être pris en compte.

du méthane et des types de biocarburants différents. On cherche donc aussi à quantifier les glucides et les protéines présents dans la biomasse algale.

Des problèmes économiques à surmonter

Les obstacles techniques ont été surmontés jusqu'à un certain point en laboratoire ou dans des établissements pilotes, mais le plus grand défi reste la viabilité commerciale des biocarburants tirés des algues, c'est-à-dire leur production à un prix compétitif. Ces 30 dernières années, les estimations les plus optimistes donnaient un coût de production d'environ 26 centimes par litre, et les plus pessimistes de plus de 10 euros par litre. Sans une valeur de référence fiable, il sera difficile de quantifier la réduction des coûts obtenue grâce aux progrès techniques. Nous avons donc tenté de préciser les coûts de production, en nous fondant sur les techniques actuelles.

Pour ce faire, nous avons appliqué les méthodes d'analyse technico-économique utilisées pour la génération précédente de

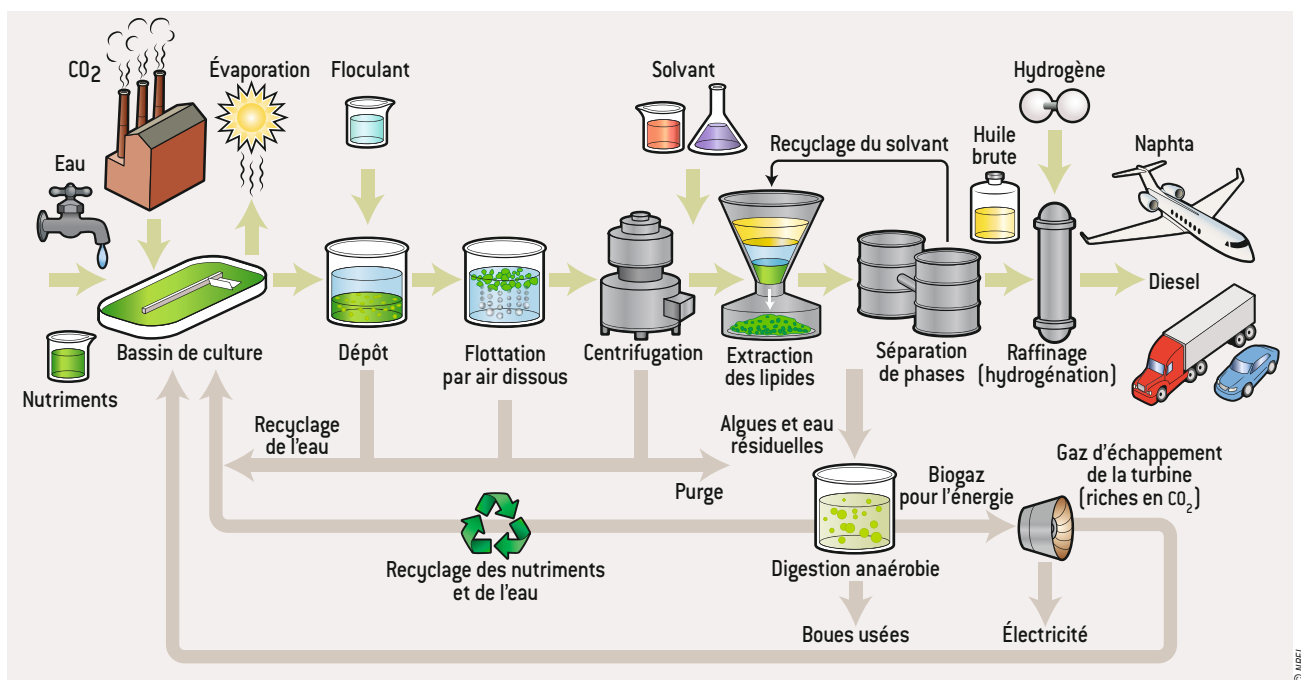
biocarburants, fondée sur la ligno-cellulose (bois, pailles, feuilles...) et qui en est à un stade préindustriel (caractérisé par le passage d'installations pilotes aux premières usines commerciales). Nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de production, pour les bassins ouverts comme pour les photobioréacteurs fermés. Nos modèles incluent la culture, la récolte et la concentration des algues, l'extraction et la récupération des lipides, puis enfin la conversion en carburant. Ils considèrent qu'une partie de la valeur énergétique de la biomasse algale est récupérée sous forme de méthane; d'autres coproduits pourront leur être incorporés dans le futur. Les flux en matériau et en énergie calculés servent à déterminer la taille des équipements requis, les investissements nécessaires et les frais d'exploitation.

Selon notre analyse publiée en 2011, une installation de 38 millions de litres par an aurait un coût de production compris entre 2,6 et 5,3 euros par litre de biocarburant. Ce coût dépend de nombreux paramètres, mais deux d'entre eux sont particulièrement importants : la teneur en lipides des algues et leur vitesse de croissance (voir l'encadré page ci-contre). En les améliorant et en développant les

coproduits, nous pourrions réduire les coûts. D'une façon générale, la composition de la biomasse influe notablement sur l'aspect économique. La proportion et la nature des protéines et des hydrates de carbone dans les algues déterminent l'intérêt de la biomasse résiduelle, une fois les lipides extraits. Par exemple, une biomasse riche en sucre fermentescible peut être transformée en éthanol, qui a une plus grande valeur commerciale que le méthane.

Aujourd'hui, les données expérimentales affluent, car de multiples opérations pilotes sont en cours. Elles permettront d'améliorer les modèles. Les hypothèses sur l'efficacité technico-économique du recyclage des nutriments et de l'eau seront aussi testées.

Une autre difficulté est la grande variabilité des teneurs en lipides rapportées dans la littérature scientifique pour une algue donnée. Elle résulte en partie de la diversité des méthodes d'extraction et des types de solvants employés... En outre, les huiles extraites contiennent d'autres composants que les lipides incorporables dans les carburants (tels la chlorophylle et d'autres pigments, ainsi que des protéines et des glucides hydrophobes). On doit donc



6. UNE BIORAFFINERIE ALGALE a été modélisée au laboratoire des auteurs de l'article. Les algues sont cultivées dans des bassins ouverts où rentrent de l'eau, des nutriments minéraux, du CO₂ et de la lumière solaire. Les cellules sont récoltées par flocculation (on les fait s'agréger en flocons) et flottation par air dissous (du gaz pousse les flocons vers la surface), puis concentrées par centrifugation. La majeure partie de l'eau est recyclée, le reste étant écarté pour éviter la concentration des sels et

des déchets de culture. Les lipides sont extraits à l'aide de solvants, puis changés en carburant par divers traitements. Les solvants sont récupérés et réutilisés. La biomasse résiduelle est transformée en biogaz par digestion anaérobie. Ce biogaz actionne des turbines qui alimentent la bioraffinerie en électricité. Les nutriments des boues usées sont récupérés et renvoyés dans les bassins. Un recyclage poussé est essentiel pour réduire les coûts et assurer la viabilité de ce système.

mesurer la fraction « carburant » – la teneur en acides gras des lipides extraits – de ces huiles. Une harmonisation des méthodes est nécessaire pour évaluer précisément les améliorations de productivité : nous devons être certains qu'un accroissement observé de la quantité de lipides extraits n'est pas un artefact de la mesure.

Dans ce contexte, on cherche de plus en plus à mesurer directement la quantité d'aides gras, plutôt que celle de lipides. Ces acides gras étant les composants clefs des biocarburants, on obtient ainsi une bonne estimation du potentiel réel des algues.

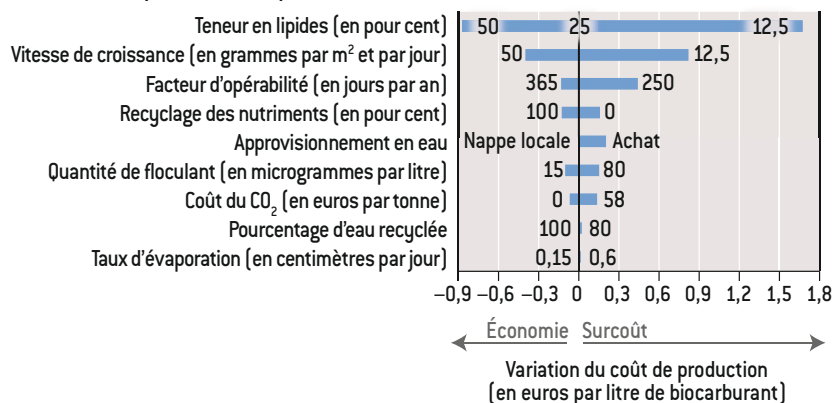
Des critères environnementaux à respecter

Les biocarburants doivent être non seulement rentables, mais aussi « durables », c'est-à-dire respectueux de l'environnement. Les critères sous-jacents sont définis par exemple dans une directive européenne datée de 2009. La durabilité se caractérise notamment par la quantité de dioxyde de carbone émise par unité d'énergie libérée, en comparaison avec l'essence ou d'autres carburants. D'autres facteurs sont pris en compte, tels que l'utilisation des sols – en particulier si l'on doit récupérer des terrains agricoles ou forestiers – et la consommation de nutriments. Il s'agit par exemple de l'azote, mais surtout du phosphore, dont les réserves sont limitées ; son utilisation pour les algues risque alors d'entraîner une compétition avec les cultures alimentaires. Les ressources en eau posent également problème, notamment si de l'eau douce est utilisée dans des bassins ouverts, où elle s'évapore. Enfin, la production d'un biocarburant doit consommer moins d'énergie que celle qu'il fournit.

Bien que ces critères paraissent évidents, ils sont difficiles à prendre en compte dans les calculs, comme le montre le débat sur l'éthanol issu du maïs. C'est particulièrement vrai pour les biocarburants algaux, car nombre de valeurs nécessaires aux calculs ne sont que des estimations ou des hypothèses. Seules quelques évaluations globales ont été réalisées, mais elles n'ont indiqué que de faibles bénéfices en termes de bilan énergétique et d'émission de gaz à effet de serre. Il est crucial d'améliorer ces calculs. Les énormes investissements en recherche et développement nécessaires ne

LES FACTEURS INFLUANT SUR LE COÛT DE PRODUCTION

Les coûts de production du carburant algal sont plus ou moins sensibles à différents paramètres, comme l'illustre le diagramme ci-dessous (calculé pour des cultures en bassins ouverts). Les nombres indiqués sur les barres bleues sont les valeurs extrêmes prises par les paramètres en ordonnée. Les deux paramètres les plus influents sont la teneur en lipides et la vitesse de croissance des algues : ainsi, lorsque la teneur en lipides passe de 25 pour cent (valeur de base) à 12,5 pour cent, le coût augmente de 1,7 euro par litre ; à l'inverse, si cette teneur passe à 50 pour cent, le coût diminue de 90 centimes par litre. Les mêmes changements provoquent des variations similaires en proportion dans les cultures en photobioréacteurs, mais ils ont un impact plus important sur les sommes absolues, le coût total du biocarburant produit étant plus élevé.



sont justifiables que si nous prouvons que les carburants extraits des algues seront plus intéressants que ceux dérivés du pétrole.

Les biocarburants d'origine algale ont été critiqués, car les défis techniques sont considérables et car ils ne pourront pas être commercialisés avant cinq à dix ans – voire 10 à 20 ans, selon Gilles Peltier, du CEA, à Cadarache, qui précise que cela dépendra notamment de l'évolution du prix du pétrole. Néanmoins, des progrès importants ont été réalisés dans tous les domaines : la culture, la récolte, l'extraction et la compréhension des mécanismes biologiques. Les modèles technico-économiques se sont perfectionnés, et de nouvelles données viennent les enrichir. Les estimations de coût disponibles deviennent plus précises et plus utiles – même si elles restent pour l'instant assez élevées. Les incertitudes diminuent et les risques sont mieux connus, ce qui accroît la confiance des investisseurs. Cette confiance a entraîné une augmentation des ressources privées et publiques allouées à la recherche sur les microalgues. Bien que le chemin vers la commercialisation soit encore long et coûteux, il vaut la peine d'être parcouru : les microalgues pourraient participer notablement à réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et les émissions de dioxyde de carbone...

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Sun *et al.*, Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels, *Energy*, vol. 36, pp. 5169-5179, 2011.

U.S. Department of Energy, U.S. billion-ton update : Biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry, Oak Ridge National Laboratory, 2011.

A. Clarens *et al.*, Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks, *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 1813-1819, 2010.

H. Greenwell *et al.*, Placing microalgae on the biofuels priority list : A review of the technological challenges, *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, pp. 703-726, 2010.

LES CINQ PILIERS

La coopération est répandue dans le monde animal. Elle se serait imposée grâce à cinq stratégies distinctes que peuvent adopter les individus.

Martin Nowak

Avril 2011 : les réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima sont en train de fondre, à la suite du tremblement de terre et du tsunami qui ont ravagé la côte Nord-Est du Japon le 11 mars précédent. Un agent de maintenance, âgé d'une vingtaine d'années, se porte volontaire, avec d'autres, pour pénétrer dans la centrale et tenter d'en reprendre le contrôle. Il sait que l'air est contaminé et que cette décision l'empêchera d'avoir des enfants, de crainte qu'ils héritent de graves maladies. « Nous sommes peu à pouvoir faire ce travail », déclare cet homme, qui souhaite rester anonyme, au quotidien britannique *The Independent*. « Je suis jeune et célibataire, et il est de mon devoir d'aider à régler ce problème. »

Bien qu'ils n'atteignent pas toujours un tel degré d'héroïsme, les comportements altruistes abondent dans la nature. Au sein d'un organisme, les cellules se coordonnent pour éviter une prolifération incontrôlée, et donc un cancer. Chez de nombreuses espèces de fourmis, les ouvrières sacrifient leur reproduction pour servir leur reine et leur colonie. Les lionnes vivent en groupes, au sein desquels elles allaitent et élèvent les petits de leurs congénères. Et les humains s'entraident dans toutes sortes de situations : recherche de nourriture ou de conjoints, défense du territoire... Ceux

L'ESSENTIEL

- La coopération a été l'un des moteurs de l'évolution.
- Cinq stratégies font émerger ce comportement : l'individu aide soit ceux qui l'ont aidé, soit ses voisins, soit ceux qui portent les mêmes gènes que lui, soit ceux qui ont bonne réputation, soit tous ses semblables.
- Les humains constituent l'espèce qui coopère le plus, car leur langage perfectionné leur permet d'échanger des informations sur leurs semblables, et donc d'optimiser la stratégie fondée sur la réputation.

Norma Bar

qui aident leurs congénères ne mettent pas nécessairement leur vie en jeu, mais ils risquent de réduire leur succès reproductif au bénéfice de ceux qu'ils assistent.

La coopération intrigue les biologistes depuis longtemps, car elle semble contredire le concept de « lutte acharnée pour la vie » proposé par Charles Darwin. Ce dernier expliquait l'évolution par la sélection naturelle : les individus dotés de caractéristiques avantageuses se reproduisent plus que les autres et leurs descendants sont les plus nombreux au sein de la génération suivante. Il en résulterait une compétition sans merci, où l'on pourrait croire plus pertinent de mentir et de tricher que d'aider un rival. Dans le poème *In memoriam* (1850), Alfred Tennyson s'est fait le chantre d'une conception extrême – encore largement partagée – de l'évolution, en décrivant une nature ayant « le rouge aux griffes et aux dents ».

Mais dans ce cas, pourquoi la coopération est-elle si répandue ? Au cours des 20 dernières années, j'ai étudié cet apparent paradoxe à l'aide de la théorie des jeux. J'ai montré que, loin d'être contradictoires, coopération et compétition ont œuvré ensemble pour faire évoluer la vie sur Terre. J'ai également précisé la façon dont la coopération émerge dans une population et les raisons pour lesquelles elle est particulièrement présente chez l'homme.

DE L'ENTRAIDE



Un paradoxe de la théorie des jeux, nommé dilemme du prisonnier, illustre pourquoi la coopération a déstabilisé les biologistes évolutionnistes. Imaginons deux suspects arrêtés et placés dans des cellules différentes. Le procureur leur fait la même offre : « Si un seul d'entre vous dénonce l'autre, il sera remis en liberté et l'autre aura la peine maximale (dix ans). Si personne ne dit rien, la peine sera normale (un an). Mais si chacun accuse l'autre, vous serez tous deux condamnés à une peine intermédiaire (cinq ans). »

Comme les détenus sont interrogés séparément, ils ignorent si leur complice trahira ou restera solidaire. En notant les issues possibles sur ce qu'on nomme une matrice des gains (voir l'encadré page 70), on constate que, d'un point de vue individuel, le choix le plus rationnel est d'accuser l'autre. Pourtant, si les deux inculpés raisonnent ainsi, ils seront condamnés à cinq ans de prison, au lieu de un s'ils coopèrent.

À la fin des années 1980, avec mon directeur de thèse à Vienne, Karl Sigmund, nous avons simulé sur ordinateur une version élargie de ce dilemme, impliquant de nombreux acteurs, pour observer l'évolution des stratégies individuelles. Nous avons d'abord réparti aléatoirement ceux qui font cavalier seul et ceux qui coopèrent. À chaque partie du jeu simulé, les gagnants

TRAHIR, UNE ATTITUDE NATURELLE ?

Le dilemme du prisonnier, un paradoxe de la théorie des jeux, illustre pourquoi la coopération est inattendue dans la nature. Deux malfaiteurs risquent une peine de prison dépendant de leur attitude : soit ils se taisent, soit ils dénoncent leur complice. Parce qu'aucun des deux ne sait ce que son partenaire va faire, le choix le plus rationnel est de trahir, car cela minimise la peine quel que soit le choix de l'autre [voir le tableau ci-contre]. Pourtant, comme les deux raisonnent de la sorte, ils aboutissent à une peine plus longue (cinq ans) que s'ils avaient coopéré en gardant le silence (un an).

		INDIVIDU 2	
		COOPÈRE (ne dénonce pas)	NE COOPÈRE PAS (dénonce)
INDIVIDU 1	COOPÈRE (ne dénonce pas)	1 an de prison 1 an de prison	10 ans de prison libéré
	NE COOPÈRE PAS (dénonce)	libéré 10 ans de prison	5 ans de prison 5 ans de prison

engendraient des descendants qui participaient à la partie suivante. Ils adoptaient la stratégie de leurs parents, sauf si des mutations, introduites de façon aléatoire dans la simulation, modifiaient leur comportement. Nous avons constaté qu'au bout de quelques générations, tous les acteurs trahissaient à chaque partie. Un peu plus tard, une stratégie « donnant-donnant » apparaissait : les joueurs commençaient par coopérer, puis reproduisaient l'attitude de leurs adversaires, coopérant s'ils coopéraient et trahissant s'ils trahissaient. Cette nouvelle stratégie a vite conduit à des communautés dominées par la coopération.

Des vampires secourables

On nomme réciprocité directe l'imitation du comportement de coopération ou de trahison d'individus rencontrés à plusieurs reprises. Les chauves-souris vampires, qui vivent en groupes stables et rentrent chaque soir au nichoir, pratiquent cette stratégie. Si une chauve-souris échoue dans sa chasse et ne peut se nourrir par elle-même, elle sollicite ses congénères à son retour. Souvent, l'une d'elles régurgite une partie de son repas de sang dans la gueule de la quémandeuse. Des études ont montré que les chauves-souris se souviennent de celles qui les ont aidées quand elles en avaient besoin. Et lorsqu'une chauve-souris qui a prouvé sa générosité par le passé manque à son tour de nourriture,

celle qu'elle a un jour secourue lui vient en aide presque à coup sûr.

Autre résultat intéressant de nos simulations, la réciprocité directe a évolué. En 20 générations, le « donnant-donnant » a laissé place à une stratégie plus généreuse, où les joueurs continuaient de coopérer même si l'autre faisait défaut. En un sens, nous avons assisté à l'apparition de la clémence, puisque les joueurs fermaient les yeux sur des fautes occasionnelles.

La réciprocité directe est donc une stratégie individuelle qui favorise la prédominance de la coopération dans une population. Plus tard, j'ai identifié quatre autres stratégies aboutissant au même résultat. Tous les scénarios élaborés depuis pour décrire le succès évolutif de la coopération exploitent une ou plusieurs de ces cinq stratégies.

La deuxième de ces stratégies consiste à se regrouper entre individus coopératifs ou à aider ses voisins. Une sélection dite spatiale s'opère alors. Au sein d'une population, les groupes d'individus secourables peuvent s'élargir et s'imposer. La sélection spatiale concerne aussi les organismes simples. Ainsi, certaines cellules de levure coopèrent : elles produisent une enzyme servant à digérer les sucres et la libèrent dans le milieu extracellulaire, mais cette attitude a un coût physiologique. D'autres n'en fabriquent pas et exploitent la production de leurs consœurs. Deux études menées indépendamment par Jeff Gore, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), et Andrew Murray, de l'Université Harvard,

ont montré que lorsque les cellules productrices et les « tricheuses » sont réparties uniformément dans la population, les tricheuses dominent. En revanche, lorsque les cellules qui coopèrent sont regroupées, elles s'imposent.

La troisième stratégie, peut-être la plus efficace, est celle de la coopération entre individus génétiquement apparentés : on parle de sélection de parentèle. Les individus aident ceux qui portent les mêmes gènes qu'eux. Ainsi, malgré la réduction de leur propre succès reproducteur, ils favorisent la dissémination de leurs gènes. Le généticien britannique John Haldane (1892-1964), qui a conçu la notion de sélection de parentèle, a déclaré : « Je me jetterais dans une rivière pour sauver deux frères ou huit cousins », se référant au fait que nous partageons quatre fois plus d'ADN avec nos frères et sœurs qu'avec nos cousins germains. Toutefois, le calcul de l'efficacité réelle de la sélection de parentèle est compliqué, et les mathématiques sous-jacentes font l'objet d'intenses débats.

La quatrième stratégie qui favorise l'émergence de la coopération est la réciprocité indirecte. Elle consiste à aider un inconnu en se fondant uniquement sur sa réputation – et non sur le fait qu'il nous ait déjà aidé, comme dans la réciprocité directe. Si la chance tourne, un individu connu pour porter assistance aux autres sera à son tour aidé. Chez les macaques japonais, par exemple, ceux qui occupent une position hiérarchique inférieure toiletent leurs supérieurs (qui ont bonne réputation du fait de leur statut). Ainsi, ils améliorent leur propre réputation et sont davantage l'objet de soins, juste pour avoir été vus en compagnie de l'élite.

Enfin, un acte peut être commis pour le bien de tous, et non d'une seule personne : c'est la cinquième stratégie par laquelle la coopération émerge, grâce à un mécanisme nommé sélection de groupe. Il a été décrit dès 1871 par Darwin, dans son ouvrage intitulé *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*. Le biologiste y écrivait : « Si une tribu compte beaucoup de membres [...] toujours prêts à s'entraider et à se sacrifier pour le bien commun, elle l'emportera sur la plupart des autres tribus ; c'est donc un mécanisme de sélection naturelle. » Depuis lors, l'idée que la sélection naturelle favorise la coopération en améliorant le potentiel

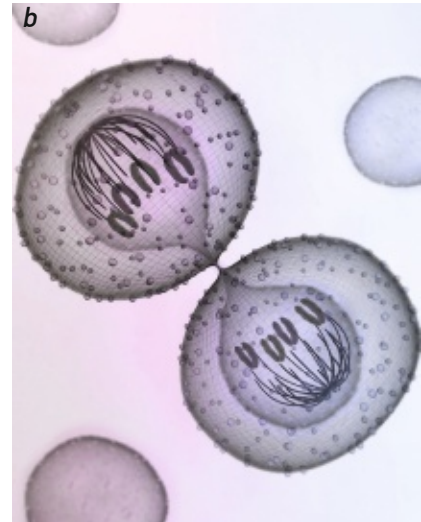
reproductif du groupe suscite de vifs débats. Les modèles mathématiques ont montré que la sélection opère à de multiples niveaux : gènes individuels, groupes d'individus apparentés, espèces entières... Ainsi, les employés d'une société rivalisent entre eux pour gravir les échelons, mais ils coopèrent pour que leur entreprise surmonte la concurrence.

Les humains : des supercoopérants

Les cinq stratégies qui favorisent la coopération s'appliquent à tous les organismes, et même parfois aux gènes et autres composants cellulaires. Cette universalité suggère que la coopération a eu un rôle moteur dans l'évolution et ce, dès le début. C'est particulièrement vrai pour l'espèce humaine, qui est celle qui coopère le plus. Des millions d'années d'évolution ont transformé le singe, animal lent et sans défense, en la créature la plus influente de la planète. Notre espèce a inventé une gamme étonnante de technologies et accompli de multiples prouesses, ce qui a nécessité une coopération intensive.

Les cinq stratégies de coopération agissant partout dans la nature, pourquoi les humains sont-ils les plus aptes à s'entraider ? Selon moi, ils exploitent plus que toute autre créature la première et la quatrième stratégies, à savoir les réciprocity directe et indirecte. En particulier, la réciprocity indirecte – consistant à offrir son aide en fonction de la réputation – est omniprésente et aurait participé à notre succès évolutif. En effet, notre langage perfectionné et l'attribution de noms aux individus nous permettent de partager de multiples informations sur les autres, que ce soient des membres de notre famille ou des inconnus vivant à l'autre bout de la planète. Nous sommes obnubilés par les interactions sociales et essayons de nous positionner au mieux dans le réseau qui nous entoure. Des études ont montré que les gens décident toujours en se fondant en partie sur la réputation, par exemple lorsqu'ils doivent choisir un organisme de bienfaisance ou une entreprise à soutenir.

L'interaction du langage et de la réciprocity indirecte permet une évolution culturelle rapide, qui multiplie nos facultés d'adaptation. Celles-ci seront essentielles face à l'accroissement de la population mondiale et au changement



CERTAINES FOURMIS s'entraident pour rapporter des feuilles au nid (a). Les cellules régulent leur division pour éviter de provoquer un cancer (b). Les lionnes élèvent leurs petits ensemble (c). Les macaques japonais toilent ceux qui occupent une position hiérarchique élevée et améliorent ainsi leur réputation au sein du groupe (d).

■ L'AUTEUR



Martin NOWAK est professeur de biologie et de mathématiques à l'Université Harvard, à Cambridge, aux États-Unis. Il dirige le Programme pour la dynamique évolutionniste.

LES RESPONSABLES POLITIQUES

devraient davantage prendre en compte l'importance de l'information et de la réputation pour limiter les comportements égoïstes.

■ SUR LE WEB

Diaporama sur les espèces qui coopèrent : ScientificAmerican.com/jul2012/cooperation

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Nowak et R. Highfield, *Super Cooperators : Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed*, Free Press, 2012.

D. et E. Wilson, *Pour le bien du groupe ?*, *Dossier Pour la Science*, n° 63, avril-juin 2009.

M. Nowak, *Five rules for the evolution of cooperation*, *Science*, vol. 314, pp. 1560-1563, 2006.

climatique. Pourtant, le bilan environnemental actuel n'incite pas à l'optimisme. Pourquoi avons-nous tant de mal à travailler ensemble pour préserver la planète ? Avons-nous une chance d'y parvenir ? Là encore, la théorie des jeux se révèle riche d'enseignements.

Certains dilemmes relatifs à la coopération et impliquant plus de deux joueurs concernent la gestion des biens communs. Dans ces dilemmes, si un joueur agit de façon altruiste, tout le monde en bénéficie, mais s'il agit de façon égoïste – toutes choses égales par ailleurs –, il augmente ses gains personnels. Aussi, bien qu'il souhaite que les autres coopèrent, il choisit « de façon judicieuse » de faire cavalier seul. Chacun raisonnant de même, la coopération se termine en défection généralisée.

Parmi les jeux de ce type figure la « tragédie des biens communs », décrite en 1968 par l'écologue américain Garrett Hardin (1915-2003).

Des éleveurs qui font paître leur troupeau sur des terres communes accroissent leur nombre de bêtes pour s'accaparer le plus de pâturages possibles, tout en sachant qu'ils détruisent ainsi les ressources nécessaires à tous, y compris à eux-mêmes. Au final, tout le monde est perdant. L'analogie avec les problèmes actuels est évidente, notamment pour la gestion des ressources naturelles telles que le pétrole et l'eau potable.

Tout espoir n'est pas perdu. Une série d'expériences conduites par Manfred Milinski, de l'Institut Max Planck de biologie évolutionniste à Plön, en Allemagne, et ses collègues ont révélé plusieurs facteurs incitant les gens à contribuer au bien commun. Les chercheurs ont donné 40 euros à chacun des participants et les ont fait jouer sur un ordinateur, en leur demandant d'utiliser l'argent pour sauvegarder le climat : à chaque tour, chacun devait mettre une somme de son choix dans un pot commun. Si au bout de dix tours cette somme atteignait 120 euros ou plus, alors les conditions climatiques étaient maîtrisées et les joueurs empochaient l'argent qui leur restait. Si les 120 euros n'étaient pas atteints, la situation climatique était déclarée hors de contrôle et chacun perdait tout son argent.

Les joueurs n'ont finalement pas réussi à sauvegarder le climat, ratant leur objectif

de seulement quelques euros. Toutefois, leur attitude a évolué au fil des parties, sous l'influence de certains facteurs. M. Milinski et son équipe ont découvert qu'ils avaient un comportement plus altruiste lorsqu'ils recevaient des informations fiables sur le climat, issues des recherches scientifiques. Les joueurs avaient donc besoin d'être convaincus du problème pour faire des sacrifices en vue du bien commun. Ils ont aussi agi avec plus de générosité quand leur contribution était publique plutôt qu'anonyme, c'est-à-dire lorsque leur réputation était en jeu. Une autre étude, menée par des chercheurs de l'Université de Newcastle, en Angleterre, a montré que les gens sont plus généreux quand ils se sentent observés, confirmant l'importance de la réputation.

Les facteurs influant sur le comportement commencent à être exploités, par exemple dans certains quartiers de Boston, aux États-Unis. Sur les factures de gaz, la consommation du ménage est comparée à la fois à la consommation moyenne des foyers du quartier et à celle des maisons les plus éco-efficaces. Ainsi, chacun se sent encouragé à réduire sa consommation.

Une coopération instable

Les simulations exploitant la théorie des jeux indiquent que la coopération est instable. Les périodes de prospérité où les individus coopèrent s'achèvent inévitablement en raison de la défection de certains. Pourtant, les comportements altruistes réapparaissent toujours : nos principes moraux se réajustent, en quelque sorte. Les cycles de coopération et de défection sont perceptibles dans l'histoire de l'humanité et dans les fluctuations des systèmes politiques et financiers.

Il est difficile de préciser où nous en sommes aujourd'hui dans ces cycles, mais nous gagnerions à entrer dans une phase plus coopérative. La théorie des jeux donne des outils pour cela. Les responsables politiques devraient davantage prendre en compte l'importance de l'information et de la réputation pour limiter les comportements égoïstes. En exploitant le potentiel de ces outils pour accroître la coopération, nous avons une chance d'éviter une version planétaire de la tragédie des biens communs, où toutes les ressources de la Terre sont en jeu. ■



“La Novela fait de la diffusion des connaissances un événement culturel, social, politique.”

La Novela, en est à sa quatrième édition. Il s'agit d'une initiative de la ville de Toulouse. À quel besoin, à quelle ambition répond l'organisation de cet événement ?

Nous voulons affirmer Toulouse comme métropole de la connaissance. Dans ce cadre, la Novela remplit deux objectifs : montrer aux Toulousains et au-delà aux habitants de la métropole et de la région que Toulouse, ville universitaire et de recherche, recèle un potentiel formidable ; donner aux acteurs de la recherche, aux universitaires l'occasion de rencontrer les Toulousains pour leur parler de ce qu'ils font, de partager leurs savoirs.

En quoi la Novela ouvre-t-elle la ville de la connaissance ?

Avec la Novela et avec d'autres initiatives, nous voulons dépasser l'entre-soi, ce que serait la Novela si cette manifestation n'était qu'une célébration des acteurs de la recherche. Nous voulons que chacun, même s'il n'est pas étudiant ou chercheur, soit fier d'appartenir à cette dynamique du partage des savoirs. Pour prendre un exemple : tous les Toulousains ne jouent pas au rugby, ils ne sont pas tous des supporters du Stade Toulousain, certains ignorent même les règles de ce jeu, et pourtant ils partagent un peu de la culture rugby. En ce sens, ils font de Toulouse une capitale du rugby.

Vous pensez que la Novela va élargir cette aura de connaissance dont la ville dispose par ses chercheurs, ses ingénieurs, ses universitaires ?

Oui. Cela peut sembler surprenant, mais nous voulons que la Novela soit un événement populaire. L'initiative des colporteurs des savoirs, de ces chercheurs qui vont sur les places à la rencontre du public pour partager, va dans ce sens ; les journées de rencontres entre les savoirs populaires et les savoirs académiques organisées au Mirail, quartier en reconstruction avec l'Université Toulouse 1, université de sciences humaines construite dans le même quartier et elle aussi en reconstruction, sont symboliques de notre démarche. La Novela s'inscrit dans la construction d'une « société des égaux ». Nous voulons répondre à tous ceux qui sont curieux du monde, nous voulons « rompre le cercle de la fatalité » dont parlait Jaurès qui ferait que ceux qui n'ont pas eu la chance de naître dans des familles ayant accès aux savoirs soient par la naissance laissés sur le bord du chemin.

On peut imaginer que la Novela n'est qu'un des éléments du dispositif qui conduira Toulouse à être reconnue comme métropole de la connaissance.

Oui, une des suites logiques de la Novela -dont une fonction est de réveiller la curiosité-, c'est de rassembler, de fédérer et d'accroître l'offre, d'éducation populaire. Nous avons nommé pour l'instant ce projet « université populaire ». Il s'agit d'augmenter l'offre mais aussi, et ceci est nouveau, de s'organiser pour pouvoir répondre à la demande d'information, de formation du public. Ce projet s'articulera avec celui de Quai des savoirs qui verra le jour en 2014 dans les locaux historiques de l'Université, allées Jules Guesde, ceux-là même qu'inaugura Jean Jaurès, à la fin du XIX^e siècle.

La Novela : tout le programme sur www.lanovela.fr



Les Colporteurs des savoirs : au bord de la Garonne, sur le quai de la Daurade, une centaine de personnes dialoguent avec un sociologue sur le thème des réseaux sociaux.

HISTOIRE DES SCIENCES

La formule secrète du bleu outremer

Le prix du bleu outremer, pigment extrait du lapis-lazuli, dépassait celui de l'or jusqu'à ce que Jean-Baptiste Guimet en fasse la synthèse en 1826.

Néanmoins, l'origine exacte de cette superbe couleur bleue ne fut comprise qu'en 1970.

Bernard VALEUR

D'où vient la magnifique couleur du pigment bleu outremer extrait du lapis-lazuli ? De la présence d'un composé métallique à base de cuivre, comme le supputaient les savants au milieu du XVIII^e siècle, arguant que presque toutes les substances minérales doivent leur couleur à des composés métalliques et que bien des sels de cuivre sont bleus ? L'explication est en fait tout autre : le soufre contenu dans la pierre est le seul responsable de sa couleur bleue. Émise en 1815, l'hypothèse du rôle du soufre s'est révélée exacte peu après, mais l'entité chimique à base de soufre qui donne sa couleur au lapis-lazuli n'a été élucidée... que 150 ans plus tard. Rarement la sagacité des chimistes a été autant mise à l'épreuve, non seulement pour comprendre l'origine de la couleur, mais aussi pour fabriquer du bleu outremer artificiel afin de réduire le prix exorbitant de ce pigment. Ce que réussit en 1826 le Français Jean-Baptiste Guimet, lauréat du concours lancé en 1824 par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

L'histoire du bleu outremer commence avec le lapis-lazuli (du latin *lapis*, pierre, et du persan *lazur*, bleu), aussi nommé pierre d'azur, une pierre fine prisée à toutes les époques et encore de nos jours. Les Égyptiens faisaient de cette pierre des bijoux ou des amulettes, mais n'en extraient pas un pigment, car ils avaient inventé un pigment bleu synthétique, désigné plus tard sous le nom de bleu égyptien. En revanche, en Occident, à partir du XII^e siècle,

on importait le lapis-lazuli d'Afghanistan afin d'en extraire un pigment bleu, dénommé bleu outremer du fait de sa provenance de régions « au-delà des mers ».

Le procédé d'extraction comportait de nombreuses étapes, car le simple broyage de la pierre conduit à une poudre bleu-gris bien terne : il était impératif d'éliminer les impuretés. Pour cela, on ajoutait à la pierre broyée un mélange fondu de résines, de cires et d'huiles, puis la pâte obtenue était malaxée dans l'eau. Les impuretés restaient dans la pâte, et on obtenait le pigment par des lavages et des décantations successifs. Les frais d'importation ajoutés au coût de ce procédé rendaient le bleu outremer fort onéreux – son prix dépassait celui de l'or. C'est pourquoi ce pigment était principalement réservé aux thèmes religieux, en particulier dans les enluminures au Moyen Âge, et parfois utilisé en peinture à partir du

XVI^e siècle, par des artistes tels Le Titien, Giotto ou Johannes Vermeer (voir la figure 2).

Le bleu outremer offre une couleur profonde et lumineuse, bien plus belle que celle des autres pigments bleus à la disposition des peintres jusqu'au XVIII^e siècle : l'azurite, pigment naturel constitué de carbonate basique de cuivre $[2\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2]$, le bleu de Prusse, colorant inorganique synthétique [ferrocyanure ferrique $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$] et le bleu de cobalt $[\text{CoO}, \text{Al}_2\text{O}_3]$, qui fit l'objet d'un procédé de synthèse par le chimiste français Louis Thénard en 1802.

Pourquoi le bleu outremer est-il bleu ?

À partir de la seconde moitié du XVIII^e siècle, l'analyse chimique fait des progrès considérables. Plusieurs chimistes tentent alors de percer le secret du bleu outremer. En Allemagne, Andreas Marggraf en 1768 et Martin Klaproth en 1795 montrent ainsi l'absence d'oxyde de cuivre dans le lapis-lazuli, mais la présence d'oxyde de fer, de carbonate de calcium, de sulfate de calcium, de silice, d'alumine et d'eau. Le chimiste français Louis-Bernard Guyton de Morveau suggère alors, en 1800, que la couleur est due au sulfure de fer. Il se fonde sur le fait que le lapis-lazuli contient du fer et du soufre et que, par ailleurs, son analyse d'un minerai rouge venant du Jura avait montré la présence d'oxyde de fer. Il en déduit que la couleur bleue ne peut pas être due à cet oxyde, mais à un autre com-



1. BLEU OUTREMER DE L'USINE GUIMET, en poudre et conditionné sous différentes formes.

posé du fer qui pourrait être un sulfure. En 1806, Charles Desormes et son futur gendre Nicolas Clément entreprennent à leur tour des analyses. Après une purification draconienne du pigment, ces chimistes prouvent l'absence de fer, mais la présence de silice, d'alumine, de « soude » (ancien nom donné au carbonate de sodium), de carbonate de calcium et de soufre.

Une importante découverte survient en 1814 : Benjamin Tassaert, directeur d'une usine à Verberie (Oise) appartenant à la Compagnie des Glaces de Saint-Gobain, découvre par hasard un échantillon de couleur bleue en

démontant un four à « soude ». Intrigué, il l'envoie au chimiste Nicolas Vauquelin, qui constate des analogies avec le bleu outremer extrait du lapis-lazuli, notamment une bonne résistance à la chaleur et aux bases, mais pas aux acides. Il trouve toutefois une proportion de silice plus importante. Quant à la couleur, Vauquelin pense, comme Guyton de Morveau, qu'elle est due au sulfure de fer, en dépit des analyses de Desormes et Clément montrant l'absence de fer, ce que Vauquelin n'ignorait pourtant pas...

En 1815, le chimiste allemand Johann Döbereiner émet l'hypothèse que la cou-

leur serait uniquement due au soufre. En effet, en dissolvant du soufre dans de l'acide sulfurique anhydre, il a obtenu une solution bleue. Toutefois, l'idée que seul du métal peut expliquer la couleur des minéraux est si ancrée dans les esprits que Döbereiner y adhère encore : il suppose que le soufre provient d'une substance métallique « sulfogène » – c'est-à-dire génératrice de soufre –, mais

2. LE BLEU OUTREMER NATUREL est abondamment mis en œuvre dans ce tableau du Titien, *Bacchus et Ariane* (1522-1523), conservé à la Galerie nationale de Londres.



dont le métal n'a pas encore été isolé. Huit ans passent avant qu'un chimiste britannique, Richard Phillips, conclue de ses expériences que la couleur est due à une substance non métallique.

Au cours des années qui suivent la découverte de Tassaert, les hypothèses vont bon train et l'idée que l'on devrait pouvoir fabriquer un pigment bleu de composition chimique voisine de celle du bleu outremer extrait du lapis-lazuli germe dans l'esprit de nombreux scientifiques. La Société d'encouragement pour l'industrie nationale prend alors l'initiative d'ouvrir, en 1824, un concours dont le prix (6 000 francs) récompensera celui qui synthétisera un bleu outremer bon marché (ne dépassant pas 300 francs par kilogramme).

6 000 francs pour la synthèse du bleu outremer

Si Jean-Baptiste Guimet (1795-1871) se lance dans l'aventure, c'est en grande partie grâce à sa femme, fille du peintre Jean Bidauld et elle-même peintre talentueuse, qui l'encourage avec insistance. Nul doute que Guimet a la compétence requise pour concourir : polytechnicien, il est alors commissaire-adjoint aux Poudres et Salpêtres et a inventé un nouveau procédé de fabrication du blanc de plomb, le plus important des pigments blancs.

En 1826, il réussit à produire du bleu outremer artificiel, mais il n'annonce pas sa découverte, car il veut perfectionner son procédé. En juillet 1827, il fait don d'un échantillon au peintre Dominique Ingres, qui l'emploie pour réaliser son tableau *Apothéose d'Homère*, à son entière satisfaction. Fin 1827, Guimet fournit aussi un échantillon au chimiste Joseph-Louis Gay-Lussac, qui fait une annonce à l'Académie royale des sciences le 4 février 1828. Cependant, Guimet ne veut pas divulguer son procédé, car il veut commercialiser son outremer artificiel sans subir de concurrence. Or pour gagner le concours, il doit apporter la preuve qu'il s'agit réellement d'un pigment de synthèse et non du résultat d'une extraction à partir du lapis-

lazuli. Guimet se décide alors à révéler le secret de son procédé à Vauquelin, qui est membre du comité du concours. Le prix lui est décerné le 3 décembre 1828. Le coût de son procédé est le double de celui requis par le règlement du concours, mais le comité n'applique pas cette clause à la lettre, pensant que le coût devrait baisser rapidement. À juste titre, puisque dès 1831, il sera réduit à 30 francs par kilogramme. En revanche, les détails du procédé Guimet (voir l'encadré page 78) ne seront connus qu'en 1878, soit sept ans après la mort de Guimet, grâce à son fils Émile.

Jean-Baptiste Guimet n'a pas été le seul à se lancer dans la synthèse d'un bleu outremer artificiel. L'Allemand Christian Gottlob Gmelin, professeur à l'Université de Tübingen, a débuté ses travaux en septembre 1826 et a mis au point un procédé en deux étapes qu'il a publié au printemps 1828. Pourquoi divulguer ainsi son procédé ? Parce que seul l'intérêt scientifique motivait Gmelin, et non la production industrielle. Dans un journal allemand, il revendique la priorité de la préparation d'un bleu outremer artificiel. La Société d'encouragement ne reconnaît pas cette priorité. Quant à Guimet, il réagit en remarquant qu'il avait déjà réalisé la synthèse en 1826, alors que Gmelin commençait tout juste ses expériences. Cette question d'antériorité fera l'objet d'une longue querelle entre la France et l'Allemagne, surtout durant les années 1860-1870. C'est pour y mettre un terme qu'Émile Guimet publiera, en 1878, un extrait du cahier d'expériences de son père datant de juillet-août 1826.

En 1830, Jean-Baptiste Guimet produit à Toulouse, avec l'aide de son beau-frère, Louis Bidauld, du bleu outremer pour les artistes. Ce marché étant restreint, une production à l'échelle pilote suffit. Pour passer à l'échelle industrielle, il faut trouver d'autres débouchés. Guimet envisage alors de concurrencer les autres pigments bleus (bleu de cobalt et bleu de Prusse) employés à l'époque pour l'azurage du papier et du linge. Cette méthode consiste à apporter une teinte bleutée en complément de la teinte jaune naturelle du coton ou du papier afin de procurer une impression de blanc. Les essais réalisés par la papeterie Canson-



Archives privées Guimet



Archives privées Guimet

3. L'ÉTIQUETTE D'UNE BOÎTE de bleu Guimet de la fin du XIX^e siècle (en haut) et un panneau publicitaire du premier quart du XX^e siècle pour les produits colorants des usines Guimet (en bas). Le bleu est outremer, bien sûr...

Montgolfier pour azurer son papier de luxe se révèlent excellents. Guimet décide alors d'implanter en 1831 à Fleurieu-sur-Saône, près de Lyon, une usine de fabrication de son outremer artificiel, qui prend le nom de bleu Guimet. Son succès est considérable non seulement en Europe, mais aussi dans le monde entier, car bien d'autres applications voient rapidement le jour : les impressions typographiques et lithographiques, les impressions sur tissus, la fabrication des papiers peints, la peinture murale, le bleuissage du sucre, de l'amidon, des bougies, la coloration de la cire à cacheter, etc.

Succès planétaire pour le bleu Guimet

L'entreprise Guimet n'est pas la seule à produire de l'outremer artificiel. En 1855, on dénombre six autres entreprises françaises produisant 200 tonnes par an. Toutefois, l'usine Guimet, à elle seule, en produit davantage (250 tonnes par an). À cette époque, le premier producteur européen est l'Allemagne avec 40 manufactures produisant 2 000 tonnes par an, alors que l'Angleterre n'en compte que quatre, qui produisent 400 tonnes par an. La qualité et la beauté du bleu Guimet restent cependant reconnues dans le monde entier et les plus hautes distinctions lui sont décernées lors d'expositions à Paris, Londres, New York, etc.

En 1860, Jean-Baptiste Guimet confie la direction de l'usine à son fils Émile. Grand amateur d'art ayant parcouru le monde et rapporté d'innombrables objets de collection, ce dernier sera également le fondateur des musées Guimet de Lyon, puis de Paris. En 1910, il cède la direction de l'entreprise à son fils Jean, qui la fait rayonner sur les marchés étrangers. Plus de 120 représentants dans le monde sont recensés lors du décès accidentel de ce dernier, en 1920. L'activité de l'entreprise restera soutenue grâce à son fils Jacques jusqu'en 1962, année de la vente à la Société anglaise *Reckitt et Colman*. Quatre générations se sont ainsi succédé dans la production du bleu Guimet.

De nos jours, en Europe occidentale, le bleu outremer est principalement produit

par la Société *Hollidays Pigments* dans deux usines : l'une est située à Comines, dans le Nord de la France (6 000 tonnes par an), et l'autre est localisée à Hull, sur la côte Nord-Est de l'Angleterre (9 000 tonnes par an), là où Isaac Reckitt créa en 1842 la Société *Reckitt and Sons*, productrice du bleu de Reckitt (à base d'outremer artificiel à partir de 1852), utilisé pour l'azurage du papier et du linge. Le groupe espagnol *Nubiola* produit aussi du bleu outremer dans deux usines (en Espagne et en Roumanie).

La production mondiale actuelle du bleu outremer est d'environ 45 000 tonnes par an, dont 23 000 de qualité supérieure. Un tel succès s'explique par les qualités exceptionnelles de ce pigment, outre sa beauté : grand pouvoir colorant, inaltérabilité de sa couleur sous l'influence de l'air, de l'eau, des matières grasses, de la lumière et des rayons ultraviolets. Sans oublier son absence de toxicité : contrairement à la grande majorité des pigments minéraux, il ne contient pas de métaux lourds, souvent toxiques.

Actuellement, la principale application industrielle du bleu outremer est la coloration des matières plastiques, notamment des emballages alimentaires (bouteilles d'eau minérale, par exemple). Les autres applications représentent chacune moins de dix pour cent du marché : pigments pour artistes, encres, peintures, cosmétiques, etc. Quant

■ L'AUTEUR



Bernard VALEUR est professeur émérite au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), à Paris, et chercheur au Laboratoire de photophysique et photochimie supramoléculaires et macromoléculaires (UMR 8531 CNRS/ENS-Cachan).



4. LES FOURS DE L'USINE GUIMET, à Fleurieu-sur-Saône, près de Lyon, au début du XX^e siècle.



5. L'ATELIER DE L'USINE GUIMET, à Fleurieu-sur-Saône au début du XX^e siècle.

Le secret du procédé Guimet

Le cahier d'expériences de Jean-Baptiste Guimet de 1826, dans lequel il avait consigné son procédé de fabrication du bleu outremer, fut révélé en 1878, sept ans après sa mort, par son fils Émile. Le procédé met en œuvre 37 parts de kaolin (silicate d'aluminium), 22 de carbonate de sodium, 15 de sulfate de sodium, 18 de soufre et 8 de charbon de bois (comme réducteur). La fabrication consiste en trois opérations successives : la préparation des mélanges, la cuisson et le traitement de la matière cuite obtenue.

La cuisson est effectuée soit dans des creusets placés dans un four, soit dans des fours à mouffles (qui isolent le matériau grâce à une double enveloppe), dont on règle à volonté la température et l'entrée d'air. Au cours de la première étape, le soufre en excès réagit avec le carbonate de sodium pour donner du polysulfure de sodium dont l'action sur le kaolin conduit à un composé vert, nommé outremer vert. La seconde étape consiste à convertir ce dernier en outremer bleu par action de l'air vers 800 °C, jusqu'à réaction complète. Après un long refroidissement à l'abri de l'air, le pigment brut est broyé, lavé et séché dans une étuve. Enfin, le conditionnement se fait en poudre, en boules, en cubes, ou sous forme de pastilles.

La page 24 du cahier d'expériences où, en 1826, Jean-Baptiste Guimet consignait la couleur et la stabilité du matériau obtenu selon un même protocole, en faisant varier les proportions des constituants présumés du bleu outremer.



« La fabrication du bleu outremer. Usine Guimet à Fleurbaey-sur-Saône ». Les Grandes Usines de France. Tome 16, 1982, code 4K1Y13.16.p.126. OULIV, chimie.cnam.fr/cgi/page.cgi?AKY13.16.03910203917159.391



Archives privées Guimet

6. COFFRET DE TUBES D'OUTREMER de différentes tonalités produits par l'usine Guimet au début du XX^e siècle.

À ÉCOUTER

Judi 30 août, Bernard Valeur reviendra sur le fabuleux destin du bleu outremer dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h. www.franceculture.com

à l'azurage du linge, il n'est plus effectué à l'aide du bleu outremer, remplacé dans les années 1940 par les azurants optiques fluorescents. Concernant les cosmétiques (mascara, fard à paupière, vernis à ongle, etc.), soulignons que le bleu outremer est le seul pigment bleu autorisé du fait de son absence de toxicité. Si le bleu outremer ne cesse de faire rayonner sa beauté de par le monde, c'est parce qu'il le vaut bien !

L'utilisation en peinture artistique était la motivation première de la fabrication d'un bleu outremer artificiel. Claude Monet, Pierre-Auguste Renoir, Vassily Kandinsky, etc., les artistes ne se sont pas privés de l'utiliser à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle. Vincent Van Gogh, en particulier, l'a souvent employé, notamment pour peindre le *Portrait du docteur Paul Gachet* (1890), dont le fond est à base de bleu outremer, mélangé à du blanc de plomb pour les parties les moins foncées. Le fameux bleu Klein – mis au point par le peintre français Yves Klein à la fin des années 1950 et nommé IKB (*International Klein Blue*) – est aussi à base de bleu outremer. L'originalité de l'IKB réside dans la formulation du liant, qui n'est ni de l'huile ni de l'eau, mais une pâte fluide originale dans laquelle le pigment est dispersé. Sa mise au point a fait l'objet d'une collaboration avec un jeune chimiste, Édouard Adam.

Une enveloppe Soleau décrivant la composition de ce bleu a été déposée en 1960 à l'Institut national de la propriété industrielle (une telle enveloppe, inventée par Eugène Soleau en 1910, constitue une preuve de création).

Le bleu du trisulfure

Mais quelle est donc la nature exacte de l'entité chimique à l'origine de la couleur bleue ? Il a fallu attendre les années 1969-1970 pour que le mystère soit élucidé, grâce à l'étude d'échantillons par résonance paramagnétique électronique. Inventée en 1944, cette technique permet de détecter des espèces paramagnétiques, c'est-à-dire caractérisées par la présence d'un ou plusieurs électrons non appariés, et susceptibles ainsi d'acquiescer une aimantation en présence d'un champ magnétique extérieur.

Cette technique avait permis de montrer que la couleur bleue de solutions de polysulfures alcalins (en solvant basique) était due au radical anion trisulfure $S_3^{\bullet-}$ (comportant un électron non apparié). Ce radical absorbe en effet la lumière dans un large domaine de longueurs d'onde centré vers 610 nanomètres, c'est-à-dire dans les composantes orangée et rouge, donnant une teinte bleue aux substances qui en contiennent.

□ LOGIQUE & CALCUL

Les plaisirs du rectangle

Trois mille ans de géométrie n'ont pas épuisé tout ce qu'un mathématicien peut dire de l'élémentaire figure géométrique du rectangle.

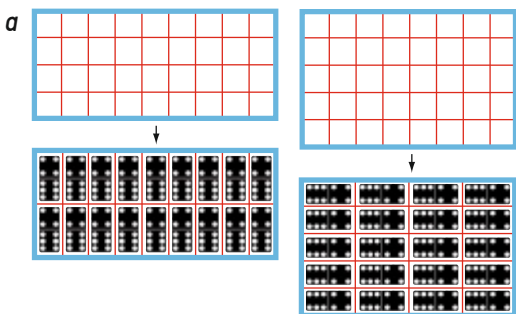
Jean-Paul DELAHAYE

Quoi de plus simple qu'un rectangle ! Pourtant ce rectangle recèle des problèmes aux beautés cachées : nous allons en voir certains qui sont inattendus. Vous serez sans doute surpris de découvrir que nombres d'entre eux sont assez récents.

Commençons par des questions élémentaires. Le problème du recouvrement d'un damier rectangulaire de côtés entiers n et m par des dominos (rectangles 1×2) est assez facile. Si n et m sont impairs, le recouvrement est impossible, car le nombre total de carrés est impair. Si n ou m est pair, c'est possible : on aligne des dominos horizontalement ou verticalement selon que n ou m est pair (voir la figure a).

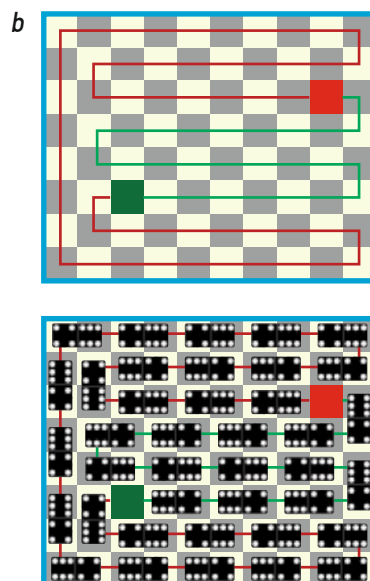
Découpage et coloriage

L'exploitation d'un coloriage bicoloré en damier permet de résoudre toutes les questions du type suivant : en enlevant deux carrés (1×1) d'un rectangle $n \times m$ (n ou m pair), peut-on encore recouvrir ce qui reste du rectangle avec des dominos ?

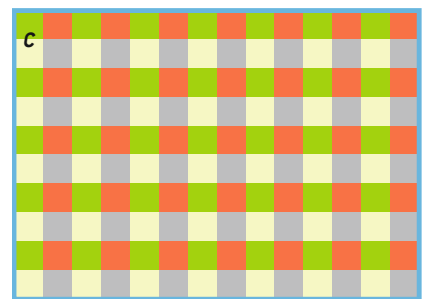


Si les deux carrés enlevés sont de la même couleur, par exemple aux deux coins diagonalement opposés, la réponse est négative : chaque domino recouvrant une case noire et une case blanche, il y a maintenant deux cases de plus d'une des couleurs. Si les deux cases enlevées sont de couleurs différentes, alors le rectangle diminué des deux cases peut être pavé par des dominos : on considère un chemin qui revient à son point de départ et qui passe par toutes les cases (si n ou m est pair, il existe) ; en enlevant deux cases de couleurs différentes, il reste deux bouts de chemin de longueur paire (en vert et en rouge sur la figure b), qu'il est facile de recouvrir par des dominos.

Ces raisonnements par coloriage sont puissants et parfois subtils. Ainsi, comment



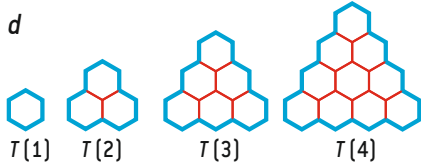
prouver que l'on ne peut pas recouvrir exactement un damier 10×14 avec des rectangles 1×4 , bien que 140 soit un multiple de 4 ? Colorions le damier avec quatre couleurs comme sur la figure c (ci-dessous). En



posant verticalement ou horizontalement un rectangle 1×4 sur les cases de ce coloriage, il couvre nécessairement deux cases d'une couleur et deux cases d'une autre couleur. Si on pouvait recouvrir le damier 10×14 avec des dominos 1×4 , le nombre de cases vertes (par exemple) couvertes serait donc pair. C'est impossible, car il y a 35 cases vertes. Le même raisonnement montre qu'on ne recouvrira jamais par des rectangles 1×4 les rectangles 6×6 , 6×10 , 6×14 , 10×10 , 10×14 , et plus généralement les rectangles $(4n + 2) \times (4m + 2)$ qui ont pourtant tous un nombre de cases multiple de 4.

Notons que les raisonnements avec des coloriages ne peuvent pas démontrer toutes les impossibilités de recouvrement : en 1990, John Conway et Jeffrey Lagarias, après avoir étudié soigneusement ce que peuvent donner les arguments de coloriages, ont proposé un problème dont ils ont démontré qu'il est impossible à résoudre par un argument de coloriage.

Ce résultat ne concerne pas les rectangles, mais les figures $T(n)$ formées d'hexagones juxtaposés (voir la figure d). J. Conway et J. Lagarias ont montré que $T(n)$ est pavable par des copies de $T(2)$ si $n = 12k$ ou $n = 12k + 2$ ou $n = 12k + 9$ ou $n = 12k + 11$. Dans les autres cas, le pavage de $T(n)$ par $T(2)$ est impossible, mais aucun argument de coloriage n'aboutira.



Pavages par rectangles 1×2 et 1×3

Les pavages par les rectangles 1×2 et 1×3 semblent faciles à obtenir. C'est à la fois vrai et faux. D'une part, d'après un résultat démontré en 1995 par Danièle Beauquier, Maurice Nivat, Eric Remila et Mike Robson, le problème *Une figure composée de carrés juxtaposés est-elle pavable par des rectangles 1×2 placés horizontalement et des rectangles 1×3 placés verticalement ?* est NP-complet. Il s'ensuit qu'on ne connaît aucun algorithme fonctionnant en temps polynomial qui réponde à la question. Les problèmes NP-complets sont considérés comme impossibles à résoudre en pratique : les temps de résolution croissent trop vite quand la valeur des données augmente.

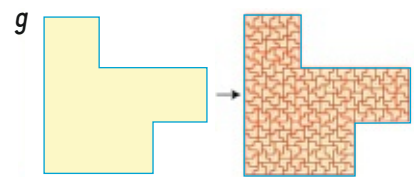
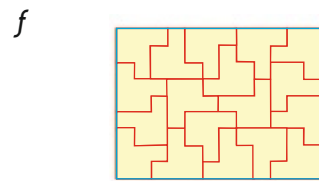
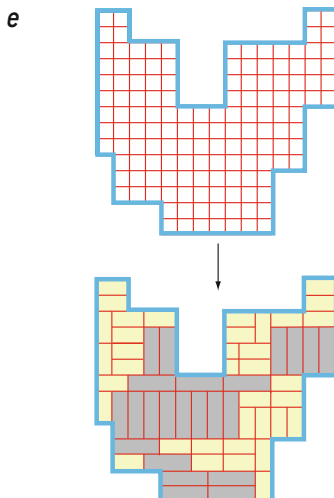
D'autre part, parallèlement au résultat indiquant qu'il est difficile de trouver les pavages envisagés par les rectangles 1×2 et 1×3 , un résultat affirme que ce type de pavage est parfois facile à trouver : si on n'impose plus le positionnement horizontal des rectangles 1×2 et vertical des rectangles 1×3 , alors tout change. E. Remila a établi que le problème *Une figure composée de carrés juxtaposés est-elle pavable par des rectangles 1×2 et 1×3 (sans contrainte d'horizontalité ou de verticalité) ?* se traite en temps proportionnel au nombre de carrés de la figure à paver, c'est-à-dire rapidement (voir la figure e).

Les démonstrations de ces deux résultats sont bien sûr assez délicates et nous

ne les détaillerons pas, mais elles illustrent l'idée que la prise en considération des algorithmes introduit un intéressant renouvellement en géométrie : les mathématiciens étendent toujours les domaines sur lesquels leur curiosité se porte.

Les problèmes de pavage avec des dominos, ou plus généralement des polyminos (formes composées de plusieurs carrés juxtaposés), n'ont pas qu'un intérêt ludique. David Vanderhaeghe, de l'INRIA à Grenoble, et Victor Ostromoukhov, de l'Université de Montréal, ont conçu en 2008 une méthode de représentation graphique fondée sur les pavages de rectangles à l'aide de polyminos permettant un meilleur rendu esthétique. Le découpage d'une image en « pixels » pas trop réguliers et pas trop bien rangés est meilleur que les codages tirés des réseaux totalement réguliers habituels faits de grilles rectangulaires. Partant d'un pavage de rectangles par un polymino fixé (étudiés soigneusement par Michael Reid dans les années 1990), on en déduit un pavage du polymino par lui-même (voir les figures f et g). Ce pavage utilisé plusieurs fois permet de découper facilement tout rectangle en « pixels » irréguliers aussi fins qu'on le souhaite.

Le problème le plus simple concernant le pavage de rectangles par des rectangles et qui généralise celui du rectangle 10×14 cité plus haut est le suivant : *Dans quels cas des copies d'un petit rectangle $a \times b$ remplissent-elles exacte-*



ment un grand rectangle $n \times m$? (n, m, a et b sont des entiers). Les travaux de Nicolaas de Bruijn et David Klarner ont résolu la question en 1969. Le rectangle $n \times m$ peut être recouvert par des rectangles $a \times b$ si et seulement si les trois conditions suivantes sont satisfaites :

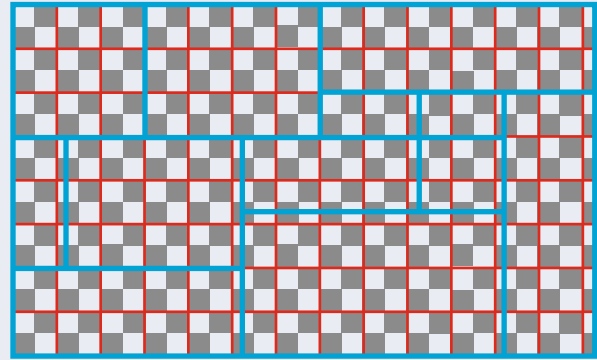
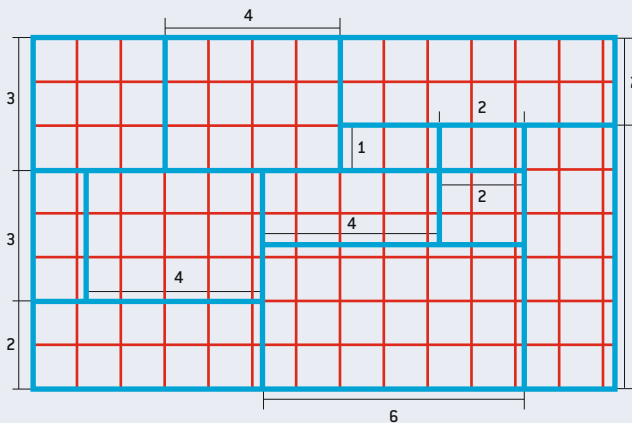
- [1] nm est multiple de ab ;
- [2] n et m peuvent chacun s'écrire comme une somme de a et de b ;
- [3] (n ou m est multiple de a) et (n ou m est multiple de b).

Paver un rectangle avec des copies d'un même rectangle

Réfléchissons aux trois conditions. La condition [1] est évidemment nécessaire. La condition [2] est elle aussi nécessaire car, si un pavage existe, en suivant le bord de longueur n du rectangle pavé, on trouvera une somme de a et de b donnant n , par exemple $2a + 5b$. De même pour m . La troisième condition est aussi nécessaire, mais cette fois, c'est nettement moins évident (si ça l'était, le résultat aurait été démontré bien avant 1969 !). Notons que si [3] est vérifiée, il se peut que ce soit n qui soit à la fois multiple de a et multiple de b , et alors m peut donc n'être multiple ni de a ni de b . Nous reviendrons un peu plus loin sur cette condition [3].

Pour voir l'intérêt du résultat de de Bruijn et Klarner, voici quelques exemples de son application. Un argument de coloriage démontre l'impossibilité du pavage du rectangle 10×14 par des pavés 1×4 , impossibilité vue auparavant. Elle n'est pas étonnante, car le théorème général la

1. Le théorème de transfert

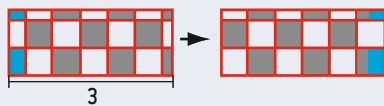


Le théorème de transfert stipule : Si un rectangle est pavé par des rectangles ayant tous au moins un côté de longueur entière, alors lui-même possède au moins un côté de longueur entière.

Démonstrons-le. Soit un rectangle de côtés a et b , dont on suppose qu'il est pavé par des tuiles rectangulaires (éventuellement différentes) dont chacune possède au moins un côté de longueur entière. Supposons que ni a ni b ne sont des nombres entiers. Cela va nous conduire à une contradiction et donc à la conclusion recherchée (a ou b est entier).

(1) On dessine un damier sur le grand rectangle en prenant des carreaux de côté de longueur $1/2$. On débute le coloriage en damier dans le coin en bas à gauche en y plaçant un carré noir (comme ci-dessus à droite).

Chaque tuile rectangulaire ayant un côté de longueur entière et posée horizontalement ou verticalement sur ce damier recouvre une aire égale de blanc et de noir. En effet, son côté entier correspond exactement à un nombre pair de carreaux du damier (comme illustré ci-dessous).

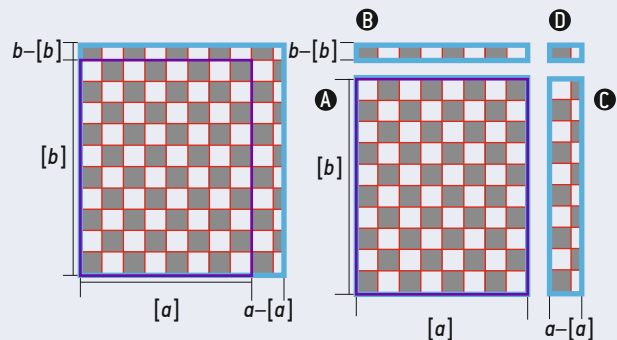


L'hypothèse que le rectangle de côtés a et b est entièrement pavé par des rectangles ayant chacun un côté de longueur entière, donc recouvrant autant de noir que de blanc, entraîne qu'il contient lui-même la même aire en blanc et en noir.

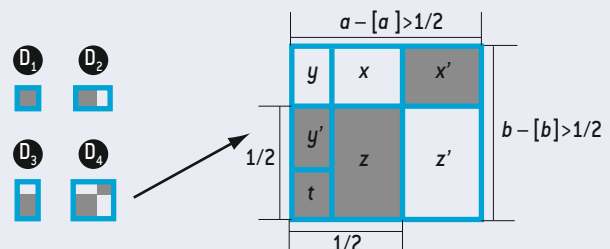
(2) Examinons comment se présente le rectangle dans son ensemble, en faisant apparaître le rectangle de côtés $[a]$ et $[b]$, où $[x]$ désigne la partie entière de x (ainsi, $[3,14] = 3$). Prenons l'exemple $[a] = 4$ et $[b] = 5$ (ci-contre au milieu). En prolongeant les côtés de ce rectangle contenu dans le rectangle de côtés a et b , on découpe quatre rectangles notés A, B, C et D (voir le dessin). Le rectangle A a une aire blanche égale à l'aire noire, car il est composé de blocs de deux carrés noirs et deux carrés blancs. Il en est de même des rectangles B et C (cela provient, comme en (1), du fait que chacun de ces rectangles a un côté de longueur entière). Reste à étudier le petit rectangle D.

(3) L'hypothèse que ni a ni b ne sont entiers signifie que $[a] < a < [a] + 1$ et $[b] < b < [b] + 1$. Quatre cas sont à considérer selon que la différence

entre a et $[a]$ est inférieure à $1/2$ ou non, et selon que la différence entre b et $[b]$ est inférieure à $1/2$ ou non. Notons-les D_1, D_2, D_3 et D_4 . Nous allons montrer que l'aire noire de chacun de ces rectangles est supérieure à son aire blanche.



Pour les trois premiers, c'est évident. Pour D_4 , il faut y regarder de plus près; mais en découpant D_4 comme le montre la version agrandie de D_4 (ci-dessous), on voit que lui aussi contient plus de noir que de blanc. Sur le dessin, les aires x et x' sont égales, de même que y et y' et z et z' . L'aire de t est donc égale à l'aire noire en excès dans D_4 .

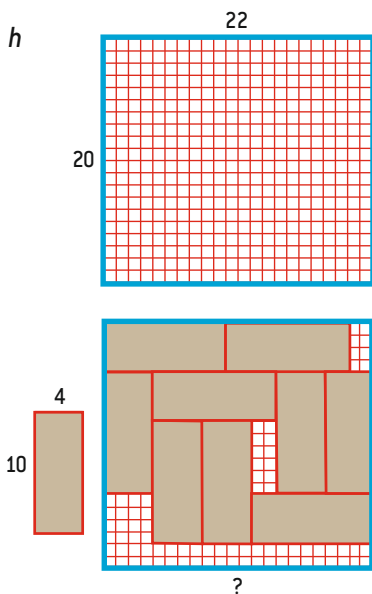


(4) Au total, pour le grand rectangle, l'aire noire est strictement plus grande que l'aire blanche. C'est en contradiction avec la conclusion du paragraphe (1). Il en résulte que l'hypothèse initiale, que ni a ni b n'étaient des entiers, est fautive. Le côté a ou le côté b est entier.

redonne ; la condition (3) n'est pas satisfaite, ni n ni m ne sont multiples de 4.

Le rectangle 16×25 peut-il être pavé par le rectangle 1×10 ? Là encore, (1) et (2) sont vérifiées, mais (3) ne l'est pas. Le pavage est impossible.

Le rectangle 21×11 peut-il être pavé par le rectangle 7×3 ? La condition (1) est vérifiée, la condition (3) aussi, mais pas la condition (2) : 11 n'est pas somme du nombre 7 (pris zéro, une ou plusieurs fois) et du nombre 3 (pris zéro, une ou plusieurs fois). Le pavage est impossible.



Le rectangle 22×20 peut-il être pavé par le rectangle 4×10 (voir la figure h) ? La condition (1) est vérifiée, la condition (3) aussi et la condition (2) est vérifiée, puisque $22 = 10 + 4 + 4 + 4$. Le pavage est possible : trouvez-le !

Transferts de propriété

Pour établir que lorsqu'on veut paver un rectangle $n \times m$ par des rectangles $a \times b$, la condition (3) doit être vérifiée, nous allons utiliser un théorème que nous nommerons « théorème de transfert » :

Si R un rectangle est pavé par une famille de tuiles rectangulaires dont chacune a au moins un de ses côtés de longueur

entière, alors R a au moins, lui aussi, un côté de longueur entière.

Il y a « transfert », des petits rectangles vers le grand rectangle pavé, de la propriété « avoir au moins un côté de longueur entière » que possède chaque petit rectangle du pavage. Ne croyez pas que la démonstration soit évidente (voir l'encadré 1).

Ce résultat est particulièrement intéressant pour de nombreuses raisons. Une première démonstration utilisait un calcul avec des intégrales doubles. En 1985, Hugh Montgomery, sans doute étonné de la difficulté des démonstrations connues, demanda à ses collègues, lors d'une réunion de l'Association américaine de

■ L'AUTEUR



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

2. Célèbres dissections

Une célèbre question de découpage de rectangle qui a donné lieu à de nombreux travaux est celle de savoir s'il est possible de paver un rectangle (ou un carré) avec des carrés de tailles toutes différentes.

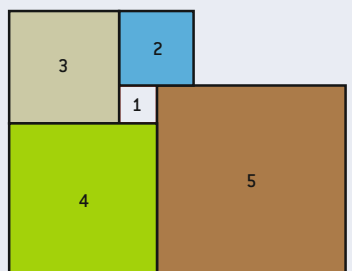
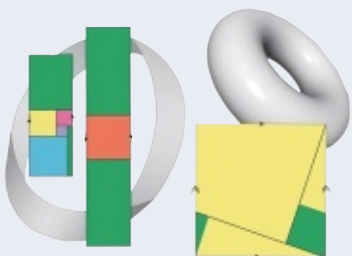
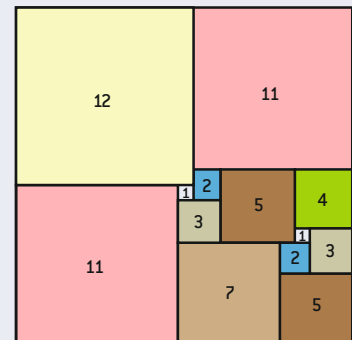
Le site de Stuart Anderson (<http://www.squaring.net/index.html>) vous donnera toutes les informations sur le sujet : histoire, résultats détaillés, recherches récentes. Parmi les variantes du problème, en voici trois.

1. On recherche les carrés pavables par des carrés et tels qu'aucun autre groupement de carrés du pavage ne forme un rectangle. Voici par exemple (ci-contre) le pavage « sans rectangle » du carré 23×23 . Une thèse de doctorat sur le sujet a été soutenue en 1999 à Marseille par Ian Gambini ; elle propose des algorithmes efficaces pour résoudre ce type de problèmes et le travail a permis la découverte de nombreux nouveaux pavages du carré.

Le carré pavable en carrés de tailles différentes ayant le plus petit nombre de carrés en contient 21. Il a été découvert en 1978 par A. Duivestijn, qui a démontré qu'on ne pouvait faire mieux que 21, et que la solution avec 21 carrés était unique.

2. On recherche un pavage du carré par des carrés de tailles différentes, mais, au lieu de se placer sur le plan, Ian Stewart se place sur la surface d'une bande de Moëbius (deux côtés du carré sont collés en inversant le sens) ou d'un tore (les côtés haut et bas, et droit et gauche sont collés sans inverser le sens) : on recolle les côtés en superposant les flèches.

3. Un étonnant résultat a été démontré en 2008 par Frederick Henle et James Henle : il est possible de paver le plan entier avec des carrés de côtés $1, 2, 3, \dots, n, \dots$ en utilisant chacun de ces carrés une et une seule fois. Ci-contre, le début (facile) de ce pavage.



mathématiques de trouver des preuves plus simples. Quelques mois plus tard, Stan Wagon publia un article qui proposait 14 démonstrations ! L'une d'elles est donnée dans l'encadré 1. Il faut bien se concentrer, mais c'est une démonstration uniquement graphique... utilisant un coloriage.

Cette collection de démonstrations d'un même résultat pas vraiment évident a été l'occasion de réfléchir à quelques questions que les mathématiciens se posent régulièrement : qu'est-ce qu'une bonne démonstration ? Quelle est la plus belle démonstration d'un résultat donné ? Un accord unanime est-il toujours possible pour désigner la meilleure démonstration ?

Dans le cas du théorème de transfert, la situation est particulièrement riche. Les avis sont partagés sur la meilleure preuve. Certaines preuves sont assez courtes, mais exigent des connaissances préalables que peu de gens possèdent. Certaines preuves se généralisent facilement et sem-

blent donc recéler un potentiel intéressant, mais plusieurs généralisations différentes sont envisageables et, du coup, le choix d'une meilleure preuve fondée sur le critère de généralisation ne conduit pas, lui non plus, à une réponse unanime : la notion de meilleure preuve est affaire de goût.

Parmi les généralisations du théorème de transfert pour les rectangles, citons en deux, intéressantes parce qu'elles montrent que, même en géométrie, la théorie des nombres n'est pas loin (ce qu'un autre résultat cité plus loin confirmera). La première est facile, mais pas la seconde.

- Transfert de la propriété « avoir un côté rationnel » : Si R est un rectangle pavé par une famille de tuiles rectangulaires et si chaque tuile du pavage a au moins un côté de longueur rationnelle (c'est-à-dire de la forme p/q où p et q sont des entiers), alors R possède aussi cette propriété.

- Transfert de la propriété « avoir un côté algébrique » : Si R est un rectangle pavé

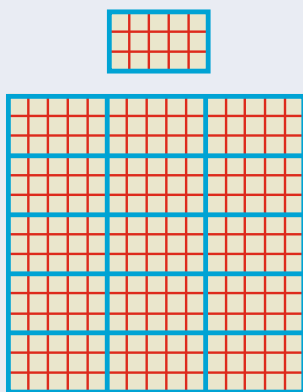
par une famille de tuiles rectangulaires dont chacune a au moins un côté dont la longueur est un nombre algébrique [c'est-à-dire un nombre solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers], alors R possède aussi cette propriété.

Revenons à la propriété [3] rencontrée quand nous avons considéré le problème du pavage d'un rectangle $n \times m$ par des copies du rectangle $a \times b$. Est-il vrai que, si un tel pavage est possible, alors nécessairement d'une part, n ou m est multiple de a et, d'autre part, n ou m est multiple de b ?

Voici le raisonnement qui prouve que oui. Prenons un rectangle $n \times m$ pavé par des copies du rectangle $a \times b$. Opérons la transformation, nommée homothétie, qui réduit toutes les tailles du facteur a . Nous avons maintenant un rectangle $[n/a] \times [m/a]$ pavé par des copies du rectangle $1 \times [b/a]$ qui possède un côté de longueur entière. D'après le théorème de transfert, n/a ou m/a est lui aussi un entier, et donc n ou m est multiple

3. Pavage d'un carré par des rectangles semblables

Un carré de côté 1 étant donné, il est facile de voir que pour tout nombre rationnel p/q (p et q entiers positifs), on peut le paver par des rectangles de proportions $1 \times (p/q)$. Cela résulte de ce qu'on sait paver le carré de côté pq par des rectangles $q \times p$ puisque les trois conditions (1), (2) et (3) du théorème énoncées sont satisfaites. Voici par exemple le pavage pour le rapport $3/5$.



La question se pose alors naturellement de savoir pour quels nombres réels t il existe un pavage du carré 1×1 par des rectangles de proportions $1 \times t$.

D'autres pavages que ceux, très réguliers, qu'on trouve quand on suppose t rationnel sont sans doute envisageables. Peut-on par exemple avoir un pavage de la forme ci-contre à droite, fait de trois rectangles semblables ?

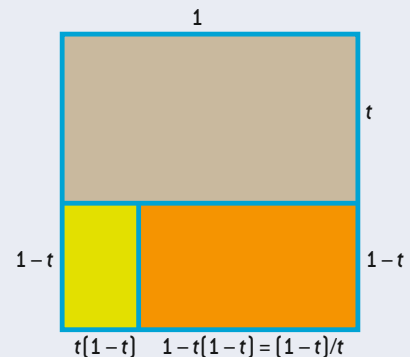
Supposons que c'est possible et notons t le rapport hauteur/longueur des trois rectangles. Le rectangle marron a pour hauteur t . Le rectangle jaune a donc comme côtés $1-t$ et $t(1-t)$. Par soustraction, cela implique que le rectangle orange a pour côtés $1-t(1-t)$ et $1-t$. La construction sera satisfaisante si ce dernier rectangle a les bonnes proportions, c'est-à-dire si :

$$t = (1-t)/(1-t(1-t)),$$

ce qui donne : $t^3 - t^2 + 2t - 1 = 0$.

Il s'agit d'un polynôme de degré 3 possédant une racine réelle unique, qui est 0,569 840 291... C'est donc la proportion qu'il faut donner exactement aux rectangles pour que le pavage du carré soit correct.

Le fait d'être tombé sur un polynôme à coefficients entiers n'est pas un hasard. Tout pavage d'un carré par des rectangles de tailles différentes, mais ayant les mêmes proportions, conduit aussi à découvrir que cette proportion t est solution d'une équation polynomiale à coefficients



entiers. Le plus étonnant est que la réciproque est presque vraie. Chris Freiling, Dan Rinne, Miklos Laczkovich et György Szekeres ont en effet démontré le remarquable résultat suivant :

Un carré peut être pavé par des rectangles semblables à un rectangle $1 \times t$ si et seulement si t est un nombre algébrique (racine d'un polynôme à coefficients entiers) et que toutes les racines de son polynôme minimal ont une partie réelle positive.

La condition « toutes les racines du polynôme minimal ont une partie réelle positive » est un peu mystérieuse ; elle ne semble pas avoir d'interprétation géométrique simple.

de a . De même, n ou m est un multiple de b . C'est ce que nous voulions obtenir.

Découpage du carré et trisections

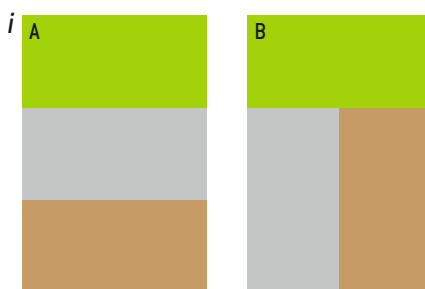
Un étonnant résultat, démontré indépendamment par C. Freiling et D. Rinne en 1994, puis par M. Laczkovich et G. Szekeres en 1995, affirme qu'un simple problème de pavage par des rectangles conduit inéluctablement à considérer l'idée de nombre algébrique (nombre solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers, tel $\sqrt{2}$ qui est solution de $x^2 = 2$), et la notion de polynôme minimal : le polynôme de plus petit degré dont x (un nombre algébrique) est solution. Voici ce remarquable résultat où les rectangles nous précipitent vers la théorie des nombres :

Un carré peut être pavé par des rectangles semblables à un rectangle $1 \times t$ si et seulement si t est un nombre algébrique et si toutes les racines de son polynôme minimal (certaines sont peut-être des nombres complexes) ont une partie réelle positive [voir l'encadré 3].

Notons les étranges conséquences de ce théorème : un carré ne peut pas être pavé par des rectangles de proportions $1 \times \sqrt[3]{2}$, alors qu'on peut le paver par des rectangles de proportions $1 \times (1 + \sqrt[3]{2})$. En effet, d'une part, le polynôme minimal de $\sqrt[3]{2}$ est $x^3 = 2$, dont les deux racines complexes ont une partie réelle négative ; d'autre part, le polynôme minimal de $(1 + \sqrt[3]{2})$ est $(x - 1)^3 = 2$, dont les racines complexes ont une partie réelle positive.

Parmi les énoncés simples concernant les rectangles, un singulier et amusant théorème a été démontré en 1992 par Samuel Maltby. Imaginons que l'on souhaite découper un champ rectangulaire en trois parties superposables (c'est-à-dire ayant exactement la même forme, et donc la même aire). Est-ce possible ? Il y a bien sûr le découpage A (voir la figure i), qui convient pour tout rectangle (et dont l'idée se généralise pour découper un rectangle en n parties superposables, pour tout $n \geq 1$). Lorsque le rapport entre la hauteur et la largeur est $3/2$, il y a aussi le découpage B.

Le théorème de Maltby, dont la démonstration occupe une bonne dizaine de pages, affirme qu'aucune « trisection du rectangle » autre que ces deux méthodes évidentes n'est possible. Le propriétaire d'un champ rectangulaire qui veut faire un partage parfaitement équitable de son champ entre ses trois enfants est obligé de leur laisser des rectangles !



Découpage en triangles de même aire

Terminons cette petite exploration (partielle) des résultats récents concernant le rectangle par le difficile (et pourtant simple à énoncer) théorème de Paul Monsky :

Si un carré (ou un rectangle) est pavé par des triangles de même aire, alors le nombre de triangles est pair.

Ce résultat qui date de 1970 a été généralisé en 1999 par Sherman Stein à tout polymino composé d'un nombre impair de carrés. Il établit donc l'impossibilité de découper chaque élément de cette famille infinie de formes en un nombre impair de triangles de même aire... ce qui semble mystérieux !

Il y a deux mois, nous avons indiqué dans cette rubrique qu'une exposition de tableaux monochromes pouvait devenir intéressante en retournant les tableaux contre les murs, car les problèmes d'accrochage sont riches en énigmes mathématiques. Maintenant, pour vous adonner à la contemplation et à la méditation mathématiques, vous savez qu'il n'est même pas nécessaire de retourner les tableaux : le rectangle du cadre, à lui tout seul, est une source inépuisable d'inspiration. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Anderson, *Tiling by squares*, 2012, www.squaring.net/index.html

B. Sury, *Group theory and tiling problems*, *Symmetry: A Multi-Disciplinary Perspective*, vol. 16, pp. 97-117, 2011.

F. Ardila et R. Stanley, *Tilings*, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 32(4), pp. 32-43, 2010.

C. Freiling et al., *Rectangling a rectangle*, *Discrete & Computational Geometry*, vol. 17(2), pp. 217-225, 1997.

M. Reid, *Tiling rectangles and half strips with congruent polyominoes*, *Journal of Combinatorial Theory A*, vol. 80(1), pp. 106-123, 1997.

J. H. Conway et J. C. Lagarias, *Tiling with polyominoes and combinatorial group theory*, *Journal of Combinatorial Theory A*, vol. 53, pp. 183-208, 1990.

S. Wagon, *Fourteen proofs of a result about tiling a rectangle*, *Amer. Math. Monthly*, vol. 94, pp. 601-617, 1987.

□ ART & SCIENCE

La table qui se prenait pour un manuel de géologie

En remerciement de ses bons offices, l'électeur de Saxe Frédéric-Auguste III a offert au baron de Breteuil une table qui est aussi un cabinet de minéralogie : elle révèle la diversité des ressources géologiques de la Saxe.

Loïc MANGIN

Le 30 décembre 1777, Maximilien-Joseph, dit « Le Bon », électeur de Bavière, meurt sans descendant. Son héritier légitime est Charles-Théodore de Sulzbach, mais d'autres prétendants se manifestent, dont l'électeur de Saxe Frédéric-Auguste III et l'empereur Joseph II. La Prusse et la Russie sont aussi de la partie et la guerre menace. De son côté, le roi de France, Louis XVI, s'inquiète et multiplie les initiatives diplomatiques. Début 1779, tous les acteurs se rassemblent à Teschen, aujourd'hui au Sud de la Pologne. Au cœur des négociations, le baron de Breteuil, ambassadeur français à Vienne, et le prince russe Repnine. Et enfin, le 13 mai 1779 est signé un traité de paix. Le rôle de Breteuil fut si prépondérant que beaucoup souhaitèrent le remercier.

Il reçut de Frédéric-Auguste III une table (voir la photographie, page ci-contre), visible cet automne à la Galerie J. Kugel, à Paris. Elle fut confectionnée par l'orfèvre Johann Christian Neuber (1735-1808). Ce dernier était déjà célèbre pour son travail de lapidaire qu'il appliquait à différents objets en vogue à la fin du XVIII^e siècle. Les plus réputés sont des « galaneries » (carnets de bal, étuis à cire...) et des tabatières. Neuber utilisait la technique de mosaïque en cloisonné (les pièces sont enchâssées dans un cadre en métal). Sa renommée grandit encore quand il inventa les « tabatières formant cabinet minéralogique » : l'idée était de flatter l'intérêt naissant pour les sciences, et notamment la minéralogie, en insérant dans la mosaïque divers échantillons de roches et de minéraux sélectionnés pour leur qualité (beauté, rareté...). Chaque tabatière était

accompagnée d'un manuel énumérant la nature et l'origine des minéraux employés.

Ce principe a également été choisi pour l'élaboration de la table, à un changement d'échelle près : les tabatières ont au plus 10 centimètres de longueur, alors que la table à un diamètre de 71 centimètres ! Le plateau de la table est lui aussi un cabinet minéralogique rassemblant 128 échantillons (sous la forme de plaquettes) numérotés et dûment décrits dans un livret fourni avec le meuble, glissé dans un tiroir discret. Klaus Thalheim, conservateur au musée de minéralogie et de géologie de Dresde, en Allemagne, a étudié cette table dite de Breteuil.

Inserées dans la table de Breteuil, les pierres les plus célèbres de Saxe sont les topazes de Schneckenstein.

Neuber a voulu montrer la diversité des roches et des minéraux que recèle la Saxe. On trouve beaucoup de calcédoines (composés entre autres de silice) sous la forme de plusieurs variétés, tels l'agate, le jaspé, la cornaline... On peut aussi repérer des pierres fines (topaze, grenat...) ainsi qu'une perle (pièce n° 1) rassemblées autour du médaillon central.

Cependant, les connaissances de l'époque ne lui permirent pas d'identifier tous les échantillons retenus qui, de par la taille requise, devaient provenir des plus beaux spécimens de sa propre collection. Ainsi, dans le livret, on note 11 fois le terme « caillou ». Par ailleurs, certains minéraux ont été mal

interprétés. Par exemple, la pièce numérotée 2 est selon Neuber une aigue-marine, alors qu'il s'agit d'une topaze bleu clair. Les deux minéraux sont bien des silicates, mais le premier (de formule $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) se distingue du second (de formule $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$) par la présence de béryllium (Be). De même, l'échantillon 10, noté « Crisolite » par Neuber, est également une topaze (verte).

À la fin du XVIII^e siècle, le géologue le plus influent en Europe était Abraham Werner, installé à Freiberg, en Saxe. Il avait mis au point une classification des minéraux fondée sur leur couleur, leur brillance... Neuber s'est sans doute inspiré de ces travaux en privilégiant des dénominations descriptives. Toutefois, la géologie n'était pas encore une science fixée et plusieurs systèmes étaient en usage.

La plupart des échantillons ont pu être identifiés d'après les critères de classification actuels par K. Thalheim, à l'exception de quatre plaquettes pour lesquelles les indications sont insuffisantes. Les pierres les plus célèbres de Saxe sont les topazes de Schneckenstein, à proximité de la frontière tchèque (5, 8, 10 et 16) : il y a 310 millions d'années, du magma de granite s'est introduit dans des schistes, ce qui a conduit, après un phénomène nommé pneumatolyse, à la formation d'un quartz-tourmaline contenant ces topazes. La table, conservée au château de Breteuil, dans les Yvelines, est désormais un précieux manuel de minéralogie. ■

« Le luxe, le goût, la science... », Neuber, orfèvre minéralogiste à la cour de Saxe, du 13 septembre au 10 novembre 2012, à la Galerie J. Kugel, 25, quai Anatole France, 75007 Paris. L'application Neuber pour iPad est disponible gratuitement.



□ IDÉES DE PHYSIQUE

Le propulseur électromagnétique

Imaginé sans doute dès le XIX^e siècle, testé par un ingénieur français il y a près de 100 ans, le canon électromagnétique devient enfin une réalité.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Mars 1917, Argenteuil, en France. L'ingénieur André Louis Octave Fauchon-Villeplée fait la démonstration d'un dispositif imaginé bien avant lui : un canon électromagnétique. Un projectile de 50 grammes et long de 27 centimètres est propulsé par la seule force d'un courant électrique à 200 mètres par seconde, et traverse 25 mètres plus loin une planche de bois épaisse de huit centimètres.

Décembre 2010, Dalgren, Virginie, aux États-Unis. Fondé sur le même principe, un « railgun » propulse un projectile de plus de dix kilogrammes à huit fois la vitesse du son, soit plus de 2 500 kilomètres par heure (695 mètres par seconde). En un siècle, les techniques ont mûri... au point que l'on commence à envisager sérieuse-

ment les canons électromagnétiques pour équiper des navires de guerre et même pour placer en orbite basse de tout petits satellites. Comment fonctionnent ces dispositifs et quelles sont leurs limites ?

Des rails, un courant et un champ

La force en jeu dans les canons électromagnétiques est la même que celle qui met en mouvement les moteurs électriques : la force dite de Laplace, qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur électrique où circule un courant.

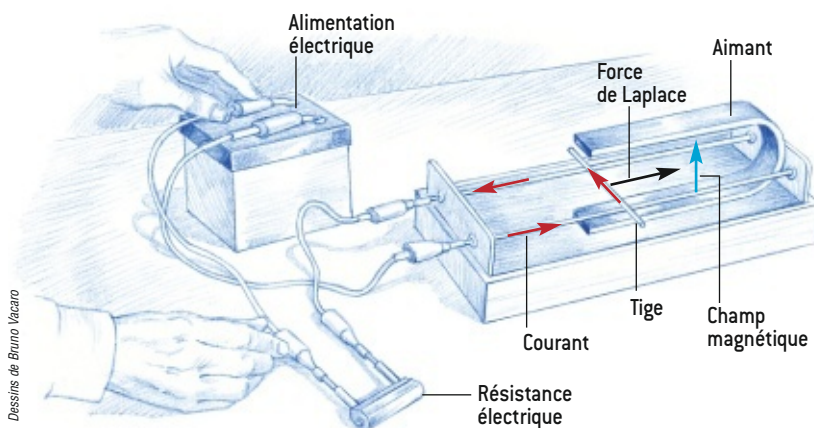
Lorsqu'un conducteur linéaire est perpendiculaire au champ magnétique, l'intensité de la force exercée par unité de longueur est égale au produit du champ magnétique

par l'intensité du courant ; sa direction est perpendiculaire à la fois au fil conducteur et au champ. Illustrons cette force de Laplace avec un dispositif linéaire dont la géométrie est semblable à celle du canon électromagnétique. C'est l'expérience dite des rails de Laplace (voir la figure 1).

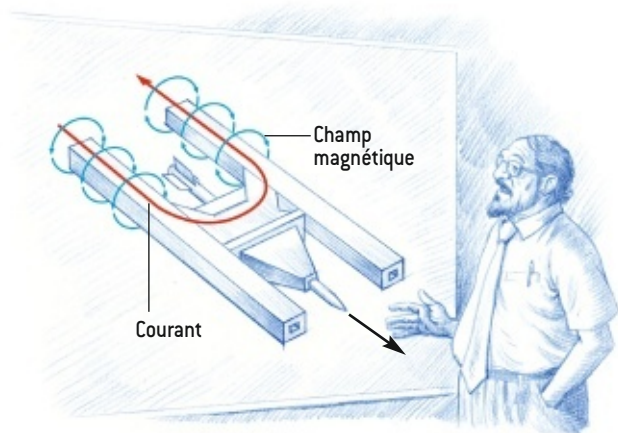
Deux rails conducteurs parallèles sont connectés aux bornes d'un générateur, et un aimant en fer à cheval crée un champ magnétique vertical uniforme entre les deux rails. Plaçons une tige métallique à cheval sur les rails. Lorsqu'on ferme le circuit électrique, cette tige est traversée par un courant. Elle subit alors une force magnétique et commence à rouler sur les rails. À mesure que la tige avance, son contact avec les rails est maintenu ; elle accélère et, si le dispositif est ouvert, est éjectée.

Prenons un aimant ordinaire produisant un champ de 50 milliteslas ; dopons l'expérience en utilisant une alimentation électrique de type « poste à souder », qui peut fournir un courant de 60 ampères ; et plaçons sur deux rails écartés de un centimètre une tige métallique pesant un dixième de gramme. La force de Laplace, égale à 30 millinewtons, est faible, mais elle suffit à produire une accélération de 300 mètres par seconde carrée, soit plus de 30 fois l'accélération de la pesanteur. Au bout des rails, longs de cinq centimètres, la tige est éjectée à la vitesse de six mètres par seconde.

Pas de quoi faire un lanceur efficace, mais c'est un bon début. Pour éjecter à plus grande vitesse un projectile plus lourd, il suffira d'augmenter le champ magnétique, le courant électrique et la longueur du propulseur.



1. LORSQU'UNE CHARGE ÉLECTRIQUE q animée d'une vitesse v est soumise à un champ magnétique B , elle subit une force magnétique égale au produit vectoriel $q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Cette « force de Lorentz » devient, à l'échelle d'un courant électrique, la « force de Laplace ». Pour un courant perpendiculaire au champ, la force de Laplace par unité de longueur de circuit est d'intensité égale à $I B$, où I est l'intensité du courant. Ainsi, dans l'expérience ci-dessus, la tige libre est propulsée.



2. UN CANON ÉLECTROMAGNÉTIQUE engendre une force de Laplace sur le projectile. À la différence de l'expérience des « rails de Laplace », le champ magnétique n'est pas fourni par un aimant extérieur, mais par le courant circulant dans les rails lui-même [tout courant électrique engendre un champ magnétique autour de lui]. Pour un courant assez fort et un écartement des rails réduit, le projectile subit un champ intense et bien orienté.

3. L'UTILISATION DE CANONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES pour placer en orbite basse des petits satellites de quelques kilogrammes est envisagée. Dans l'un des projets ayant été étudiés, le dispositif de lancement, incliné de 30 degrés, est long de 180 mètres, tandis que le projectile a une longueur de trois mètres et un diamètre de 12 centimètres ; la puissance de la source d'électricité doit être d'une dizaine de mégawatts, afin de fournir une énergie de l'ordre du gigajoule pour chaque tir.

Pour ce faire, on peut profiter du fait que les deux conducteurs qui apportent le courant à la tige créent eux-mêmes un champ magnétique. Quel est son ordre de grandeur ? Il nous est donné par la définition de l'ampère : c'est l'intensité d'un courant électrique qui, en circulant dans deux conducteurs linéaires parallèles distants de un mètre, crée entre ces deux conducteurs une force de 2×10^{-7} newton par unité de longueur. Cette force étant le produit de l'intensité électrique (un ampère) par le champ magnétique, on en déduit que le champ magnétique créé par un courant de un ampère à une distance de un mètre est de 2×10^{-7} tesla.

Profiter doublement du courant

Considérons maintenant le test effectué en 1917 par Fauchon-Villeplée. Le courant électrique envisagé était de 5 000 ampères et l'écartement des conducteurs était de l'ordre du centimètre. Comme le champ produit par un courant est inversement proportionnel à la distance du conducteur, si l'on compare cette situation à celle de la définition de l'ampère, un courant 5 000 fois plus intense et un écartement 100 fois plus petit entraînent un champ magnétique 500 000 fois plus élevé, c'est-à-dire... 100 milliteslas, soit le double du champ de

l'aimant permanent que nous avons considéré, et avec la même orientation.

C'est la bonne surprise : dès que l'on dépasse quelques kiloampères, plus besoin d'aimant permanent ! Le champ magnétique créé par les rails qui apportent le courant à la tige suffit à propulser cette dernière (voir la figure 2). Pour le courant et l'écartement considérés, on calcule que la force est de l'ordre de cinq newtons, ce qui produit sur une masse de 50 grammes une accélération de 100 mètres par seconde carrée ; d'où, au bout de deux mètres, une vitesse de 20 mètres par seconde. En pratique, pour augmenter le champ magnétique et donc l'accélération, Fauchon-Villeplée a placé de chaque côté des rails une dizaine de fils conducteurs parallèles où circule le même courant.

Ainsi, le principe du canon électromagnétique est simple. Toutefois, les obstacles ne manquent pas. Outre la question de la résistance des matériaux, tant du canon que du projectile, un problème délicat est celui du contact entre le projectile-conducteur et les rails. À faible vitesse, ce contact s'établit facilement, mais ce n'est plus le cas à plusieurs centaines de mètres par seconde. Il se produit alors un arc électrique qui peut détériorer le rail. En outre, la matière vaporisée par les frottements et l'arc électrique reste dans le canon, s'ionise et crée un plasma

LES AUTEURS



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

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Avril *et al.*, Development of advanced thermoplastic composite projectiles for high-velocity shots with the PEGASUS railgun, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39(12), pp. 3391-3395, 2011.

R. Jones, The rail gun : A popular demonstration of the Lorentz force, *American Journal of Physics*, vol. 68(8), pp. 773-774, 2000.

I. R. McNab, Early electric gun research, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35(1), pp. 250-261, 1999.

conducteur, lequel fait court-circuit et réduit notablement la force propulsive.

Un autre problème est celui de l'ouverture du circuit électrique lorsque le projectile quitte le canon. Si l'on ne veille pas à dériver à cet instant le courant injecté, un arc électrique intense se crée à la bouche du canon. Et il faut contrôler l'échauffement intense de tout le système, surtout dans la perspective de tirs à répétition.

Scientifiques et ingénieurs se sont attaqués à ces problèmes et on assiste depuis une dizaine d'années à des performances impressionnantes. Le propulseur PEGASUS, de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, avec un courant maximal d'un million d'ampères et un écartement des rails de quatre centimètres, exerce une force de plus de 100 000 newtons sur une charge de 360 grammes. L'accélération

résultante, plus de 30 000 fois celle de la pesanteur, lui fait atteindre au bout de six mètres une vitesse de plus de 2 000 mètres par seconde. Et le canon développé pour la marine américaine, avec un courant cinq fois plus intense et une longueur de 18 mètres, éjecte à une vitesse du même ordre un projectile de 20 kilogrammes.

À l'instar de Jules Verne, on peut rêver utiliser un tel canon pour envoyer des projectiles dans l'espace (*voir la figure 3*). Des projets ont été chiffrés et ce n'est plus totalement irréaliste. Deux points sont à régler : il faut pouvoir mettre en orbite des charges d'une dizaine à une cinquantaine de kilogrammes, et surtout procéder avec une accélération modérée, qui ne détériore pas le contenu. Ces canons spatiaux, s'ils voient le jour, devront ainsi mesurer quelques centaines de mètres de long. ■

Les inscriptions à l'édition 2012/2013 des Olympiades de Physique France sont ouvertes

Vous encadrez ou avez encadré pour un TPE ou un Atelier scientifique un groupe de lycéens motivés et enthousiastes, poursuivez l'aventure en inscrivant cette équipe aux XX^e Olympiades de Physique France.

Cette participation permettra à vos élèves de mettre en valeur leur travail et de partager leur intérêt avec d'autres passionnés de sciences et de physique.

Les Olympiades sont aussi l'occasion de promouvoir les sciences expérimentales dans votre établissement et auprès des nouveaux lycéens.

Informations et inscriptions :
<http://www.odpf.org>

Cloture des inscriptions : **30 octobre 2012**

Sélections régionales : **12 décembre 2012**

Finale et exposition des projets au Palais de la Découverte : **8-9 février 2012**

Les Olympiades de Physique France sont organisées par l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie et la Société Française de Physique.



ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

et sur www.pourlascience.fr/editionsnumeriques



Dossier Pour la Science n° 76

Les Néandertaliens étaient bien plus proches des hommes modernes qu'on ne l'imaginait. Plusieurs comportements montrent qu'ils ont participé à l'émergence des cultures : ils enterraient leurs morts, préparaient des pigments décoratifs, fabriquaient des bijoux en coquillages... Les Néandertaliens sont un maillon essentiel d'une longue histoire, dont les civilisations modernes ne sont que le prolongement.

Parution de juillet / septembre 2012 – Prix : 6,95 €

Découvrez *Cerveau & Psycho* n° 53 dès le 31 août.

Cerveau & Psycho n° 52

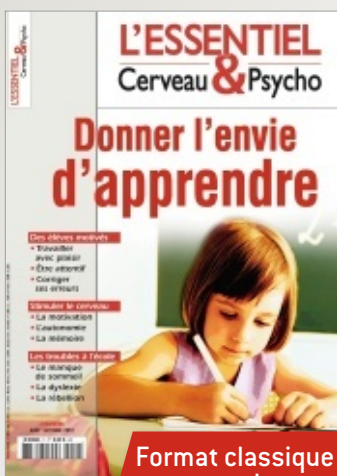
Face au bruit et à une agitation ininterrompue, chacun aspire à retrouver calme et sérénité. La méditation, une façon de se centrer sur ses émotions et ses sensations, permet d'y parvenir. Elle améliore le bien-être psychique et la santé.

En plus, retrouvez les incontournables de *Cerveau & Psycho*, par exemple la critique psychologique du film *Les Aventures de Tintin*.

Parution de juillet / août 2012 – Prix : 6,95 €



Format classique ou pocket



Format classique ou pocket

L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 11

Comment motiver les enfants ? Entretenir la curiosité que manifestent les plus jeunes ? Susciter l'envie d'apprendre et de comprendre ? Ces questions préoccupent parents et enseignants. Pour y répondre, les spécialistes des sciences du cerveau étudient comment les élèves mémorisent ce qu'on leur enseigne, ce qui les motive et quelles sont leurs difficultés. Ils apportent des réponses qui pourraient aider notamment ceux qui « décrochent ».

Parution d'août / octobre 2012 – Prix : 6,95 €

POUR LA
SCIENCE

SCIENCE & GASTRONOMIE

De l'usage raisonné des fibres

Les bonnes « fibres » alimentaires sont souvent des déchets que le cuisinier pourrait réutiliser !

Hervé THIS

On nous serine que nous devons manger des légumes et des fruits, notamment parce qu'ils contiennent des « fibres ». Est-ce vrai ? Et que sont les fibres ? Et si ces fibres sont utiles, comment les « cuisiner » ?

Les fibres alimentaires sont des parties de tissu végétal qui résistent à la digestion et atteignent le gros intestin sans être notablement transformées. Figurent dans cette catégorie la cellulose, les hémicelluloses, les substances pectiques (« la pectine »), les gommes, les mucilages, la lignine. Où les trouve-t-on ? N'importe quel tissu végétal, de la carotte à la feuille de l'épinard, est fait de cellules jointoyées par une paroi, laquelle contient des molécules de cellulose, des hémicelluloses, le tout entremêlé de molécules de pectine. Ces trois composés sont des polysaccharides : leurs molécules sont faites de « sucres » élémentaires enchaînés par centaines, soit de façon linéaire, soit de façon ramifiée. La lignine, aussi présente dans les végétaux, est également un polymère.

Tous ces composés ne sont pas égaux devant la solubilisation dans l'eau, ou devant la digestion. Par exemple, les celluloses et les lignines sont insolubles dans l'eau, et peu fermentées dans le gros intestin ; les pectines, les gommes et les mucilages sont solubles, et bien fermentés. Évidemment, le contenu en fibres diffère selon l'origine végétale, mais il n'en demeure pas moins que les régimes riches en fibres ont moins de densité énergétique, imposent une mastication plus longue et conduisent à une satiété plus rapide (bien que de courte durée).

À part réduire le coût de certains produits alimentaires industriels, à quoi servent

les fibres de l'alimentation ? L'augmentation de la teneur en fibres dans l'alimentation réduit le temps de transit intestinal, le taux de cholestérol et de glucose, piège des composés mutagènes ou cancérigènes, stimule la prolifération de la flore intestinale.

Évidemment, les préparations culinaires modifient les propriétés des fibres. Par exemple, le broyage facilite l'hydratation des fibres, en augmentant la surface de contact, ce qui conduit à une libération modifiée des nutriments. Ou encore, le trempage (de lentilles, de pois, etc.) réduit le contenu en fibres solubles (qui passent en solution), et la cuisson en milieu liquide est encore plus active (pensons aux confitures qui gélifient parce que la cuisson extrait les pectines des fruits).

Les études [D. Dhingra *et al.*, Dietary fibre in foods : a review, *J. Food Sci. Technol.*, vol. 49(3), pp. 255-266, 2012] ne sont-elles utiles qu'aux sociétés qui produisent des préparations céréalières pour le petit déjeuner ? Ou aux industriels qui vendent des « aliments fonctionnels » ? Pour ceux-là, il est vrai que l'incorporation de fibres provenant de « déchets » (pailles, peaux d'amandes, tiges de maïs, résidus du traitement de fruits et de légumes...) est une aubaine, mais les cuisiniers ne gagneraient-ils pas à utiliser des données que les médecins ont jugées utiles ?

Pensons à la centrifugation de carottes ou au pressage d'oranges, qui laissent un abondant résidu fibreux. Pourquoi ne pas le broyer (un moulin à café suffit, pour ceux qui veulent éviter l'effort du mortier et du pilon), puis l'introduire dans diverses préparations culinaires ? Par exemple, au lieu de produire des gels réduits à de l'eau et à un agent

gélifiant, pourquoi ne pas charger avec les fibres que nous n'aurions pas jetées ?

La question trouve tout son sens à l'heure où des cuisiniers s'intéressent à la « cuisine note à note », cette forme de cuisine moderne qui, pour produire des mets, fait usage de composés ou de fractions de tissus végétaux et animaux. Pour « nourrir », il faudra apporter les nécessaires nutriments, des protéines aux oligo-éléments, mais il ne faudra sans doute pas oublier d'ajouter des fibres. Lesquelles ? Combien de chaque sorte ? Ces questions restent à explorer, mais les sources déjà utilisées pour l'industrie ne sont pas à négliger. De même que la cuisine moléculaire a su faire usage de composés gélifiants bien répertoriés par l'industrie alimentaire dans les années 1980 à 2010, les chefs qui se lancent dans la cuisine note à note peuvent reprendre les études de l'industrie pour incorporer des fibres dans les aliments et mieux commander la consistance de ces derniers.

Sans oublier que la fermentation des fibres, par les micro-organismes de l'intestin, conduit à la libération de gaz... Et le cuisinier doit tenir compte de ce désagrément flatulent. Il faut manger des fibres, certes, mais en quantités raisonnables ! ■



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

→ MATHÉMATIQUES

La balade de la médiane et le théorème de Pythagore

Jean-Claude Pont

Tricorne, 2012
[96 pages, 21,60 euros].

À lire le mathématicien suisse – pardon, valaisan ! – Jean-Claude Pont, nous devenons Grecs, l'un de ces Grecs qui ont bouleversé notre vision de la géométrie. L'essence des mathématiques réside dans la liberté, a écrit Georg Cantor, et comme les Grecs, nous avons la liberté de poursuivre notre marche au fil des déductions logiques vers les vérités mathématiques. Les mathématiques sont à la fois inventées (les mathématiciens choisissent la voie) et découvertes (nul ne s'est avancé avant eux sur cette *terra incognita*).

J.-Cl. Pont livre le fruit de ses réflexions sur son domaine mathématique, parfaitement hors de la mode et plein de charme. Ce sont les triangles pythagoroniens tels que $a^2 + b^2 = 2c^2$, a , b et c étant les longueurs des côtés du triangle. Le néologisme est une concaténation de Pythagore et de Goron, le Goron étant un vin valaisan un peu moins prisé que la Dole, tout comme les triangles pytha-

goroniens n'ont pas encore la renommée des pythagoriciens.

La compréhension de cette incursion savante ne nécessite pas de connaissances mathématiques bien compliquées : c'est un vif encouragement à la dégustation et à des explorations de même type que le goût du lecteur pour les mathématiques permettra.

Après nous avoir assuré que ces triangles existent (ce ne sont pas des êtres mythologiques sans réalité), l'auteur a jeté son dévolu sur les propriétés des « descendants » d'un pythagoricien : les triangles formés par les médianes de chacun. Et là, par la Sainte Alliance de l'algèbre et de la géométrie, nous découvrons, guidés par J.-Cl. Pont, les propriétés de ces plaisants triangles. J.-Cl. Pont a créé pour nous un monde peuplé d'habitants facétieux comme les côtés « mésopotames amis » et quelques autres.

Vous ai-je dit que ce petit livre était d'une lecture délicieuse ? J.-Cl. Pont, mathématicien humoriste et rigoureux, est digne de ses prédécesseurs Abbot (pour Flatland), Sam Loyd (pour l'inventivité drolatique)... et l'illustre Bourbaki (pour l'invention du vocabulaire des concepts nouveaux).

→ Philippe Boulanger

→ GÉOLOGIE

Carnet de curiosités d'un géologue

Patrick De Wever

Ellipses, 2012
[360 pages, 23,40 euros].

L'histoire anecdotique n'a pas toujours bonne presse auprès des historiens, mais il n'en est pas moins vrai que l'anecdote est une source d'information plaisante, accessible, et plus facile à retenir que de longues



dissertations. Patrick De Wever nous en livre ici pas moins de 176 ! Le lecteur a donc l'embarras du choix, des frasques d'étudiants lillois à l'interprétation national-socialiste de l'ours des cavernes, en passant par les us et coutumes des pâtres grecs, la température de l'enfer (et celle du ciel), des fraudes paléontologiques soupçonnées ou avérées, les grilles du Jardin des Plantes, la naïveté de certains écoliers, ou encore les déclarations édifiantes de plusieurs présidents de la République.

Inattendus, souvent savoureux, parfois d'une véracité un peu discutable, ces courts chapitres, au thème géologique au sens large, ont bien tous les caractères de l'anecdote, ses forces et ses faiblesses. En tous les cas, on ne s'ennuie pas un instant à leur lecture. Au-delà de la diversité, quelques grands thèmes chers à l'auteur apparaissent : le Muséum d'histoire naturelle de Paris et son histoire, le « temps profond » de la géologie et les façons de l'appréhender, les idées reçues (pour ne pas dire les âneries) dont nous gâtons trop souvent les médias dès lors qu'il s'agit de science...

Au travers de son choix d'anecdotes, l'auteur nous révèle aussi sa conception de la science, fondée sur le scepticisme (cela ressort particulièrement de son approche des grandes extinctions, notamment celle des dinosaures) : doutant de

toutes les explications proposées, il n'en choisit aucune, ce qui ne fait pas avancer le débat. Certes, le doute fait partie de la démarche scientifique, et P. De Wever le manie souvent de façon salutaire, mais s'il devient une attitude systématique, il peut aisément conduire à un certain conservatisme. N'oublions pas que c'est à cause d'un scepticisme excessif de la part de la communauté scientifique qu'il fallut attendre 50 ans pour que les idées d'Alfred Wegener finissent par s'imposer et que l'on admette enfin que les continents se déplacent à la surface du globe !

→ Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS-Paris IV-Sorbonne

→ AGRONOMIE

Le palmier à huile

J.-Ch. Jacquemard (dir.)

Quæ, 2012
[240 pages, 25 euros].

Cet ouvrage collectif, réalisé par des chercheurs du CIRAD, est un guide pratique d'abord destiné aux producteurs, techniciens et conseillers agricoles des régions productrices de palmier à huile. Il s'agit d'un manuel complet dont tireront profit les professionnels, mais aussi tous ceux qui, à un titre ou à un autre, s'intéressent à l'enjeu mondial que représente cette culture.

Agronome et chercheur au CIRAD, Jean-Charles Jacquemard, qui a dirigé l'ouvrage, travaille depuis 40 ans sur le palmier à huile. Il a participé à la rédaction des critères RSPO (*Round Table for Sustainable Palm Oil*), dont l'objectif est de promouvoir le développement durable de cette production.

L'huile de palme est la première source de corps gras d'ori-



gine végétale du monde. Devenue indispensable dans de nombreux secteurs agro-industriels, elle est souvent décriée en raison de la déforestation et de l'atteinte à l'environnement que sa production entraîne dans les pays producteurs, ou pour ses risques nutri-

à la fois sur les cours mondiaux et sur l'extension de la production du palmier, avec les conséquences écologiques que l'on connaît. Mais on peut regretter que ce livre si pertinent, orienté sur des aspects très techniques, n'apporte pas de réelle réponse aux interrogations actuelles concernant l'usage de l'huile de palme, même si ce n'était pas son objectif.

→ **Bernard Schmitt**
CERNh, Lorient



tionnels potentiels en alimentation humaine. Cet ouvrage trouve donc toute sa place dans le débat actuel.

Après une rapide introduction qui permet de situer la place de l'huile de palme dans la production mondiale des huiles végétales et son importance dans les échanges commerciaux internationaux, les auteurs abordent méthodiquement la production et la gestion des huileries.

Le dernier chapitre traite la question de l'utilisation de l'huile de palme en nutrition humaine. Celle-ci répond à un besoin essentiel, notamment dans les pays du Sud-Est asiatique traditionnellement producteurs et consommateurs. Ses caractéristiques nutritives en font, au plan mondial, une matière première particulièrement adaptée à une utilisation agroalimentaire et agro-industrielle. Et c'est sans compter la demande mondiale de plus en plus forte en agrocarburants, et particulièrement en biodiesel, qui pèse

→ ANTHROPOLOGIE

Le sel de la vie

Françoise Héritier

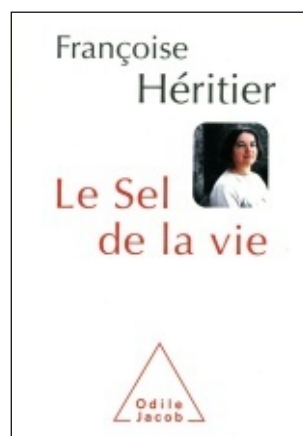
Odile Jacob, 2012
(92 pages, 18,77 euros).

La vie nous vole-t-elle ces indispensables instants de bonheur qui font le sel de la vie? Ou, au contraire, ces instants sont-ils volés au cours normal de la vie? Engagements professionnels, responsabilités accaparantes, tâches indispensables, échéances à respecter, rentabilité de l'action, carrière à faire... Nous nous complaisons souvent dans l'illusion d'une vie trépidante, pleinement vécue et remplie, voire débordante. Mais ne passe-t-on pas à côté de l'essentiel?

Interpellée par les termes d'une carte postale envoyée d'Écosse par un ami médecin en «vacances arrachées, volées à un emploi du temps surchargé», Françoise Héritier nous livre, en quelques pages denses, une méditation sur ce qui donne du sens et du goût à la vie. Irruption inattendue et «provocante» au milieu du cours normal des choses, cette missive se révèle ainsi comme un miroir de ses (de nos) propres contradictions et la conduit à une salutaire introspection remettant en cause la

hiérarchie des valeurs, qui nous gouverne habituellement. En réponse à son ami, elle se livre à un bilan, en forme d'inventaire à la Prévert, de toutes les émotions, de tous les instants, de chaque événement, – petit ou grand – qui font... le sel de la vie.

Pareille lettre ouverte pourrait apparaître en rupture avec le «sérieux» de sa production scientifique (rappelons que cette anthropologue est l'un des professeurs honoraires du Collège de France et qu'elle est directrice d'étude à l'EHESS). Mais elle constitue une tentative de réponse originale à une question existentielle majeure: qu'est-ce qui fait le bonheur des gens et des sociétés? Qu'est-ce qui fait l'essence même de notre humanité? Leçon de simplicité pleine de poésie et ardente invitation à prendre soin de nous: non pas dans une vision passéiste (notre part d'enfance, paradis perdu), mais comme moteur d'un avenir à construire à chaque instant. Que serait ce «je» agissant, dans la «banalité» d'une existence ordonnée par la rationalité, s'il était



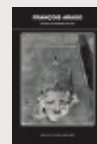
dénué de curiosité, d'empathie, de poésie, de goût pour la vie et pour les autres? Sachons mettre de la légèreté et du bonheur dans ces petits riens, «ce fatras hétéroclite» de sentiments, de sensations et

Brèves

FRANÇOIS ARAGO

Monique Sicard

Actes Sud, 2012
(144 pages, 12,80 euros).



En annonçant à l'Académie des sciences, le 7 janvier 1839, la découverte par Louis Daguerre d'un procédé simple de fixation d'une image, sans toutefois le révéler (Daguerre cherchait à le breveter), l'astronome et physicien François Arago a stimulé, partout en Occident, les recherches sur la photographie. Ce petit livre présente 60 reproductions des premiers essais, accompagnées de leur histoire.

SUR LES BORDS DU MONDE (TOME 1)

Jacques Malaterre *et al.*

Grand Angle, 2012
(48 pages, 13,90 euros).



Janvier 1912. L'équipage de sir Ernest Shackleton embarque pour l'Antarctique à bord de l'*Endurance* avec l'objectif de traverser le continent pour la première fois. Le navire est toutefois pris dans les glaces... Si cette expédition scientifique a maintes fois été contée, on connaît moins le quotidien de ses membres, leurs réactions face aux épreuves et à l'austérité du lieu. C'est cette histoire que met en scène avec talent cette bande dessinée.

LA VÉRITÉ SCIENTIFIQUE SUR LE NUCLÉAIRE

Chantal Bourry

Rue de l'échiquier, 2012
(208 pages, 14 euros).



Faut-il poursuivre dans la voie nucléaire ou se tourner vers les énergies renouvelables et les économies d'énergie? Si l'auteur, militante, est convaincue de la seconde option, son ouvrage vise plutôt à offrir au lecteur les moyens de se faire son opinion. Très documenté, il rassemble en termes simples les connaissances sur la filière nucléaire.

Brèves



GUIDE À L'USAGE DES PARENTS D'ENFANTS BILINGUES

Barbara Abdelilah-Bauer
La Découverte, 2012
(216 pages, 17 euros).

Le bilinguisme, réputé si important pour l'avenir de l'Europe, est une démarche ardue aux difficultés mal connues. Psychosociologue et mère de trois enfants bilingues, l'auteur analyse très justement les motivations de la transmission linguistique et les conditions de sa réussite. À lire et à faire lire dans ce pays désespérément monolingue, alors que des dizaines de millions de ses citoyens d'origines occitane, bretonne, alsacienne, maghrébine, flamande, malienne, chinoise, corse... auraient pu, auraient dû être bilingues !

LES CHAMPS

Dominique Poulain
Delachaux et Niestlé, 2012
(224 pages, 19,90 euros).



Vous avez apprécié cet été le parement multicolore de notre pays. Ici et là, vous avez reconnu un champ de blé, mais vous êtes resté perplexe devant... une betterave et six millions d'autres ? Voici de quoi réduire votre ignorance, du moins s'agissant de 60 des plus communes plantes cultivées. Vous apprendrez non seulement à identifier un champ, mais aussi l'essentiel sur la plante qui y est cultivée.



CURIOSITÉS GÉOLOGIQUES DE L'AUNIS ET DE LA SAINTONGE

Nicolas Charles
BRGM éditions, 2012
(112 pages, 19 euros).

À u Nord du Médoc se trouve une charmante petite région quaternaire, dont l'île de Ré et la Dune du Pilat ne sont pas tout. Ce petit ouvrage raconte l'histoire de ses roches sédimentaires et présente chacune de ses curiosités géologiques.

d'émotion qui font «le sel de la vie». Assurément salitaire pour nous, scientifiques, pris quotidiennement dans la spirale des urgences !

→ Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

→ ENTOMOLOGIE

Où les papillons passent-ils l'hiver ?

Patrice Leraut
Quæ, 2012
(144 pages, 19 euros).

Guide photo des papillons d'Europe

T. Haahtela, K. Saarinen, P. Ojalainen et H. Aarnio
Delachaux & Niestlé, 2012
(383 pages, 24,90 euros).

Nous avons tous couru derrière un papillon. Voici deux ouvrages complémentaires pour comprendre ces êtres vivants et colorés. Moi-même, pleine de ces souvenirs de chasse aux papillons dans le jardin de mon père, je les ai ouverts avec plaisir et le sourire aux lèvres. J'avais particulièrement en mémoire la façon dont les citrons et paons du jour aimaient batifoler sur les dahlias, aussi ai-je, dans un



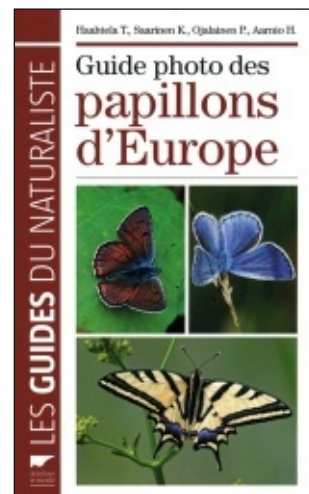
premier temps, recherché les passages concernant ces deux papillons, l'un de la famille des Pieridés et l'autre un Nymphalidé.

Patrice Leraut, alors, m'a appris que l'un comme l'autre hivernent à l'état adulte et font partie des papillons vivant les plus vieux : jusqu'à dix mois, alors que la durée de vie moyenne des papillons n'est que de trois semaines !

Ainsi, ces deux livres pour le naturaliste amateur, petit ou grand, l'informeront à loisir sur ce joli sujet d'histoire naturelle. P. Leraut a organisé son document autour de 100 questions liées à la morphologie, à la reproduction, au développement et à la répartition des lépidoptères. Il aborde aussi les relations entre l'homme et les papillons. De la première interrogation «Quelle est l'origine du mot papillon», à la dernière «Quel avenir pour les papillons et les "papillonneux" ?», en passant par «À quoi servent les couleurs et les dessins des ailes ?», la progression du propos ressemble à une enquête au pays de ces insectes à la métamorphose complète, aux ailes recouvertes d'écaillures et aux pièces buccales transformées en trompe.

Ces questions et leurs réponses cumulées finissent par produire une compréhension complète du sujet. Le lecteur apprend ainsi par exemple que les papillons entendent les ultrasons émis par les prédateurs tels que les chauves-souris ; que leurs antennes constituent un organe sensoriel important ; ou encore que la ponte peut avoir lieu en vol au-dessus des lieux où pousse la plante nourricière de la chenille.

Écrit par quatre naturalistes finlandais, le second ouvrage est



pour sa part fondé sur un principe de reconnaissance photographique. Ses images de grande qualité en font un concentré d'information et de beauté. On y apprend notamment qu'il existe dans le monde environ 135 000 espèces de papillons, dont 7 000 en Europe et 5 300 en France. Beaucoup sont nocturnes. Pour leur part, les espèces diurnes européennes ne sont qu'au nombre de 482. Les auteurs les présentent réparties en six familles, qui font l'objet d'une description préalable aux fiches par espèce. Outre le biotope, des informations éthologiques, les particularités physiques d'identification, sont aussi indiqués la plante nourricière, l'aire de répartition géographique par l'intermédiaire d'une carte, le caractère endémique et le statut de protection réglementaire. Ces excellents auteurs nous renseignent même sur la facilité avec laquelle tel ou tel individu de telle espèce se laissera photographier !

→ Régine Touffait
ONF, Paris

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