

■ POUR LA

SCIENCE

Février 2011 - n° 400

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les langues d'Europe

D'où viennent-elles ?

Le Rubik's Cube

Le résoudre
en 20 mouvements

La théorie du Tout est-elle une utopie ?

Les physiciens face
à différentes pistes

Le bananier

Une herbe essentielle
à l'alimentation
du monde

N° 400

M 026 97 - 400 - F: 6,20 €



En plus, dans ce numéro :

La science de demain en images

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance



casden



BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine
notre identité reflète
nos valeurs

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, Bénédicte Salthun-Lassalle, Jean-Jacques Perrier

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,

Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifedayo Fadoju

Marketing : Héli Chappes

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Launet

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 : Elisabeth Blanc,

Christophe Bonnaud, Bernard Calvino, Ismaël Cognard,

Pierre Fayet, François Ganachaud, Évelyne Host-Platret,

André Langan, Carole Lartigue, Denis Le Bihan,

Annick Loiseau, Christophe Pichon, Cyril Poupon,

François Rechmann, Patrick Simon, Anne Tursz.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

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

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffard. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

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

Commande de dossiers ou de magazines :

02 37 82 06 63 (de l'étranger : 33 2 37 82 06 62)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse, 1000 Avenue du Commerce, 1000

Québec, H3N 1V3 Canada.

Suisse : Servidoc, Chemin des châtaignes, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky

Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark

Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate

Wong, President : 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 conte-

nus 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'adap-

tation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le

nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-

rican, 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-Augus-

tins - 75006 Paris).



de **Françoise Pétry** directrice de la rédaction

Enquête de théories

Le physicien et chimiste Pierre Duhem (1861-1916) s'est intéressé au statut de la théorie en physique dans son ouvrage *La théorie physique, son objet et sa structure*, publié en 1906. Il en a donné une définition : « Une théorie physique n'est pas une explication. C'est un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement qu'il est possible un ensemble de lois expérimentales. » Selon lui, une théorie résume les lois sous une forme synthétique, et quand elle est achevée, elle révèle la structure du monde réel, elle devient une « classification naturelle ».

Cette impression est sans doute celle d'un physicien face à une théorie « juste ». Selon le physicien Steven Weinberg, Einstein a sûrement éprouvé le sentiment que sa théorie de la relativité restreinte « ne pouvait qu'être juste ». Au contraire, lui-même, S. Weinberg, ne ressent pas cette « évidence » face à la théorie de la supersymétrie, cette tentative d'unification des diverses interactions fondamentales. La supersymétrie n'est qu'un aspect de la quête de cette théorie du

Une théorie n'est pas une explication.

Tout sur laquelle travaillent les physiciens des particules. Mais l'heure n'est guère à l'optimisme, car il ne semble plus certain que cette théorie unique existe. Peut-être faudra-t-il admettre que plusieurs briques en partie distinctes sont nécessaires pour construire l'édifice théorique étendu (voir le dossier : *La quête d'une théorie unifiée des interactions*, page 61).

À défaut de théorie « achevée », les scientifiques utilisent des modèles qui leur permettent de préciser une théorie en cours d'élaboration. C'est le cas dans de nombreux domaines, celui de la diffusion des langues (voir *L'arrivée des langues indo-européennes en Europe*, page 32) ou de la théorie de l'évolution, sans cesse précisée (voir *L'évolution par fusion*, page 50). Ces modèles ont leurs limites, car si une théorie n'est pas une explication, un modèle ne reproduit pas strictement la réalité.

Pourtant, l'heure est aux modèles, et ils font progresser la compréhension de divers mécanismes. C'est l'un des domaines que la rédaction a choisi de mettre en avant pour le numéro 400 de *Pour la Science* (voir *Aperçus de la science de demain*, page 40). Dans ces quelques pages figurent sans doute plusieurs sujets qui aideront à la construction de nouvelles théories !

1 **ÉDITO**

4 **BLOC-NOTES**
Didier Nardon

Actualités

6 **L'asymétrie du vivant viendrait de l'espace**

7 **Une histoire de famille néandertalienne**

10 **Aérosols atmosphériques : une question de taille**

12 **Des rayons gamma dans les orages**
... et bien d'autres sujets.

16 **ON EN REPARLE**

Opinions

18 **POINT DE VUE**
Le Mont-Saint-Michel restera-t-il une île. À quel prix ?
Fernand Verger

19 **ÉCONOMIE**
Résponsable et coupable
Ivar Ekelund

20 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
La nature risque-t-elle de devenir silencieuse ?
Valérie Guansigaud

22 **VRAI OU FAUX**
Voit-on des taches sombres en cas de glaucome ?
Laurent Maloum

24 **QUESTIONS OUVERTES**
Vers la privatisation des vols spatiaux ?
David Friedman
La NASA envisage de sous-traiter les vols habités à des entreprises privées. Au-delà des questions techniques et de sécurité que poserait une telle décision, cela pourrait paradoxalement conduire à les développer.

À LA UNE



32 **LINGUISTIQUE**

L'arrivée des langues indo-européennes en Europe

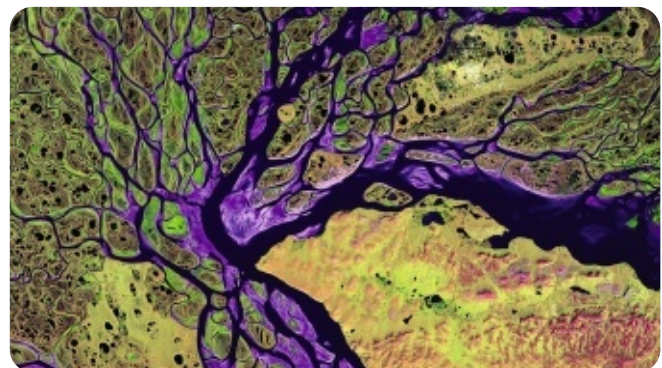
Ruth Berger

La paléogénétique et la linguistique assistée par ordinateur livrent de nouveaux indices sur la diffusion des langues.

50 **BIOLOGIE**
L'évolution par fusion

Marc-André Selosse

L'arbre de l'évolution porte des branches qui se ramifient au fil du temps. Mais pas seulement : par un mécanisme dit d'évolution par fusion, certaines branches fusionnent parfois avant de diverger à nouveau.

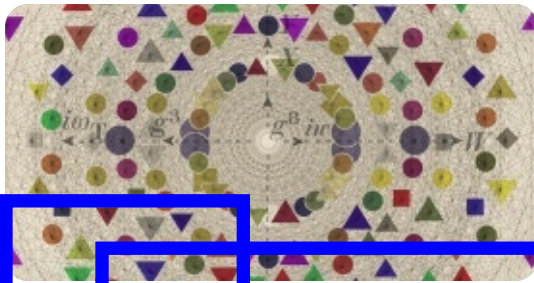


N° 400

Dans ce numéro, découvrez nos
Aperçus de la science de demain



PHYSIQUE THÉORIQUE

**La quête
d'une théorie unifiée
des interactions**→ **Mon dieu l'unification***Entretien avec Steven Weinberg*→ **L'insaisissable théorie unifiée***Stephen Hawking*→ **Une théorie géométrique du Tout***Garrett Lisi et James Weatherall*

78

AGRONOMIE

Le bananier, un enjeu mondial*André Lessoudière*

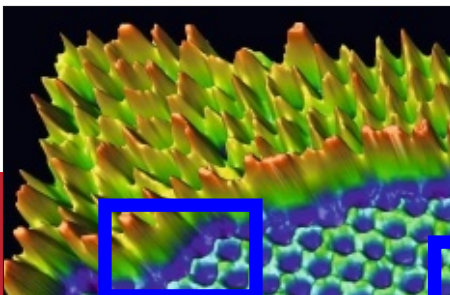
Le bananier est l'une des principales ressources alimentaires de la planète. Depuis une vingtaine d'années, une agriculture raisonnée et durable de la banane est mise en place pour répondre des besoins toujours croissants.

86

ASTROPHYSIQUE

Improbables planètes*Michael Werner et Michael Jura*

Il existe des planètes autour d'étoiles atypiques, où il ne devrait pas y en avoir. Le processus de formation planétaire serait-il plus universel qu'on ne le pensait ?



p. 40

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commande de livres et abonnement pages 88 et 89.
En couverture : © Shutterstock/Gulei Ivan

Regards

94

HISTOIRE DES SCIENCES

**Un théorème géométrique
parmi les Pensées de Pascal***Dominique Descotes*

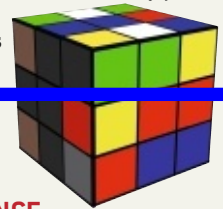
Des notes de géométrie de Pascal ont été retrouvées au verso d'un feuillet des *Pensées*, révélant les coulisses d'un de ses ouvrages mathématiques, les *Lettres de A. Dettonville*.

98

LOGIQUE & CALCUL

**Le Rubik's Cube :
pas plus de 20 mouvements !***Jean-Paul Delahaye*

Le cube de Rubik est le numéro un de tous les casse-tête. Trente ans après son invention, on continue à y jouer et à résoudre les problèmes qu'il pose.



104

ART & SCIENCE

**Esthétique dans le décor...
à Versailles***Loïc Marguin*

106

IDÉES DE PHYSIQUE

Prote de la houle*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

109

SCIENCE & GASTRONOMIE

Attention au froid !*Hervé This*

110

À LIRE

Rendez-vous sur **SCIENCE.f**

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 1000 vidéos
- L'agenda des manifestations scientifiques

» Les services en ligne

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

www.pourlascience.fr

→ PÉCHÉ DE COMPLEXISME

Certaines idées simples peuvent être bien vues, suffire, et mener loin ; certaines idées complexes peuvent être vaines et confuses. Seulement, beaucoup d'intellectuels voient le simplisme comme un péché suprême. Du coup, ils pèchent par « complexisme » : victimes d'une déformation professionnelle, ils croient que les idées complexes ont, par nature, une pertinence supérieure aux idées simples. Devenus trop subtils à force de s'exercer au raffinement, ils théorisent des situations ou des faits qui n'en demandent pas tant. Il n'y a pas toujours matière à élaboration, dans la vie.

Ceux qui s'appliquent trop aux idées complexes deviennent ordinairement incapables des simples.

→ SUSPENSE SCIENTIFIQUE

Selon le *roman* de Peter Andersen, Tycho Brahe a servi de modèle au personnage de Claudius dans *Hamlet*. La question *To be or not to be* ? est une allusion cryptée : T(ych)o B(rah)e or not T(ych)o B(rah)e ? Mauvaise nouvelle pour les traducteurs : rendre la phrase anglaise à l'aide de mots ayant les mêmes lettres initiales et finales, de façon à garder l'allusion, ne va pas être une mince affaire...

L'observation certaine faite par Peter Andersen le mène-t-elle, comme il arrive souvent, à une conclusion incertaine ? Prudence. Il a d'autres arguments (dont la

presse a rendu compte ces temps derniers) pour soutenir que :

1) contrairement à la légende, Tycho Brahe n'est pas mort d'un éclatement de la vessie pour s'être trop retenu pendant un repas royal, mais a été empoisonné ;

2) son futur assassin l'a nargué en suggérant à Shakespeare de faire mourir Claudius de la façon dont Tycho Brahe allait mourir.

Si la thèse de Peter Andersen finit par s'imposer à la science (en l'occurrence, l'histoire), sera enrichie d'un savoir nouveau, mais la littérature n'aura rien gagné. Si la thèse est cartée comme une billevesée, la littérature sera enrichie d'une jolie fiction née du cerveau imaginaire de Peter Andersen, mais la science n'aura rien gagné. Un

exemple de plus du fait que concilier les intérêts de la science et ceux de la littérature

n'est pas simple. Qu'un savant du calibre de Tycho Brahe ait inspiré un écrivain du calibre de Shakespeare ne s'y suffit pas.

→ LES CLÉS DU SUCCÈS

On peut imaginer que, dans les conditions orales, posséder une voix forte aide plus à s'imposer qu'avoir de la finesse. Notre civilisation ne s'y prend pas mieux. La puissance de l'imprimerie l'a menée à la lettre : aucun lecteur ne saurait connaître et juger lui-même tous les livres susceptibles de l'intéresser. Du coup, le hasard et l'habileté de l'auteur dans l'art de capter l'attention jouent un rôle majeur dans la réception d'une œuvre. « Il n'est pas si aisé de se faire un nom par un ouvrage parfait, que d'en faire valoir un médiocre par le nom qu'on s'est déjà acquis » (La Bruyère).

En facilitant la publication, la technologie moderne aggrave ce travers. La profusion des œuvres augmente ; la probabilité qu'à chacune de recevoir un examen loyal diminue donc ; la hiérarchisation qui naît entre elles devient encore plus douteuse. La meilleure chance de succès d'une œuvre réside dans l'entregent médiatique de son auteur. Pour se faire entendre, il faut être visible.

Le progrès technologique insufflé une vigueur accrue à cet archaïsme qu'est la foire d'empoigne.

→ PIERRE FERMAT...

Dans une lettre à Fermat datant du 29 juillet 1654, Pascal pose un problème (relevant de ce qu'on appelle aujourd'hui la combinatoire). La lettre commence en français, mais Pascal change soudain de langue : « Par exemple, et je vous le dirai en latin, car le français n'y vaut rien » écrit-il, et il se met à exposer en latin une assez longue explication. Le lecteur actuel sourit : c'est le latin qui, pour lui, n'y vaut rien. L'édition moderne annotée n'a aucun mal à traduire en français la démonstration mathématique que Pascal avait rédigée en latin.

ZUT ! Depuis que j'ai parlé du silence des espaces infinis, je reçois plein de pubs pour des anxiolytiques...



Sur ce choix de langue, Pascal n'a pas été original. Selon le latiniste Jürgen Leonhardt, en effet, on a tort de croire que, historiquement, les sciences de la nature ont été pionnières dans l'utilisation des langues nationales. Au contraire. Soucieux d'avoir un accès international, les savants ont publié en latin jusqu'au début du XIX^e siècle (La grande histoire du latin, CNRS Éditions, 2010, p. 206).

Ainsi, le fait que les scientifiques actuels semblent moins réticents que d'autres professions à échanger en anglais avec leurs collègues s'inscrit dans la longue durée. Le désir d'avoir une audience internationale les pousse vers l'anglais, comme il poussa leurs prédécesseurs vers le latin. Peut-être, alors, n'est-on pas irrégulier à l'égard de Pascal en imaginant que, s'il vivait aujourd'hui, il enverrait très naturellement des mails à Fermat en anglais...



→ LA VOIX DU PLUS FORT EST TOUJOURS LA MEILLEURE

I n'y a pas de méditerranée à traverser. Instruitif tel ou tel débat, et à ne pas s'intéresser à celui-ci. Par exemple, prétendre que je m'intéresse au changement climatique serait exagéré. La thermodynamique, la dynamique des fluides, les statistiques, les probabilités, les équations différentielles, la modélisation, etc., sont autant de sujets qu'il faut connaître bien pour se faire une idée sur la question. Tel n'est pas mon cas. Je ne pourrais m'exprimer sur le climat qu'à condition de répéter ce que d'autres disent. Or ce n'est pas s'intéresser à un sujet que d'être incapable d'élaborer une opinion personnelle dessus.

Pourtant, le débat sur le changement climatique est instructif. Il met en évidence la loi d'indépendance de la véhémence et de la compétence. Que certains climatologues soient véhéments parce que leur travail les mène à prévoir des dangers dont ils pensent devoir avertir la population, c'est légitime. Mais on ne me fera pas croire que ceux qui sont véhéments (et ils sont nombreux !) possèdent tous les énormes connaissances nécessaires pour avoir une opinion éayée. Ces suivistes se sont rangés à un camp, mais ne poussent pas leur intérêt pour le sujet jusqu'à se donner les moyens d'une analyse sur le fond. Pour quoi crient-ils si fort, alors ? Parce qu'ils prennent cela pour une preuve qu'ils sont dans le vrai.

Comme souvent, ce qu'un débat a de plus instructif, c'est ce qu'il a de moins neuf. Car ce n'est pas d'hier qu'on voit la véhémence tenir lieu de compétence. ■



Ligue
Européenne
Contre la
Maladie d'Alzheimer



APPEL A CANDIDATURE POUR DES BOURSES POUR LA RECHERCHE BIOMEDICALE ET CLINIQUE FONDAMENTALE SUR LA MALADIE D'ALZHEIMER

La Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer (LECMA) octroie des bourses pour la recherche scientifique sur la maladie d'Alzheimer destinées aux scientifiques d'institutions et universités françaises.

Les demandes de **bourse standard** sont acceptées à concurrence de 80 000 € pour deux ans avec un maximum de 40 000 € par an.

Les demandes de **bourse pour des projets pilotes** par de jeunes chercheurs sont acceptées à concurrence de 40 000 € pour deux ans avec un maximum de 20 000 € par an. Seuls les chercheurs avec une thèse de Sciences achevée au plus tard en novembre 2011 et ayant un maximum de 6 ans d'expérience en recherche scientifique sont éligibles.

Les candidatures pour des projets franco-allemands et franco-hollandais peuvent être déposées par des chercheurs en France, en Allemagne ou aux Pays-Bas. La valeur ajoutée de ces projets coopératifs doit être significative dans le domaine de recherche proposé. Les dossiers de candidature peuvent être envoyés à LECMA ou aux associations partenaires allemande ou hollandaise.

Les subventions accordées seront mises à disposition à partir de novembre 2011.

La date limite d'envoi des lettres d'intention est le **14 mars 2011**. Elles doivent être rédigées en anglais et envoyées à : e.wiese@alzheimer-research.eu.

Un original et une copie doivent être envoyés à :
Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer
94 rue La Fayette, 75010 Paris.

Des informations complémentaires et le formulaire de lettre d'intention sont accessibles sur :

www.maladiealzheimer.fr

Pour toute question, merci de contacter le Dr Ellen Wiese, PhD (coordinatrice scientifique internationale) au :
+ 49-211-86-20-66-21

ou par email :

e.wiese@alzheimer-research.eu

Depuis sa création en 2005, LECMA a financé 21 programmes de recherche pour un montant total de plus de 1,2 million d'euros.

Astrobiologie

L'asymétrie du vivant viendrait de l'espace

Dans le milieu interstellaire, le rayonnement entraînerait un excès d'une des formes symétriques des molécules du vivant.

Un rayonnement ultraviolet polarisé circulairement aurait donné naissance, dans le milieu interstellaire, à des molécules présentes sous leurs deux formes symétriques en proportions inégales. C'est le cas des 70 acides aminés d'origine interstellaire qui ont été retrouvés dans la météorite de Murchison, tombée en 1969 en Australie (*ci-dessous*). On connaît, dans l'espace, des objets, tels que la nébuleuse d'Orion, qui émettent un rayonnement polarisé circulairement, mais dans le domaine de l'infrarouge (*ci-contre*).



NASA / ST



Certaines molécules, dites chirales (ou énantiomères), existent sous deux formes symétriques l'une de l'autre dans un miroir. Les molécules du vivant sont pour la plupart chirales, certaines formes étant privilégiées. Ainsi, les acides aminés n'existent quasiment que sous leur forme gauche (lévogyre), tandis que les sucres sont présents uniquement sous la forme droite (dextrogyre). On parle d'homochiralité lorsqu'une seule forme est présente dans la nature. C'est pourquoi l'une des deux formes est-elle privilégiée dans le monde du vivant.

L'équipe de Louis d'Hendecourt, de l'Institut d'astrophysique spatiale (Université Paris-Sud/CNRS), a obtenu un excès de molécules lévogyres dans une expérience reproduisant les conditions de l'espace interstellaire. De quoi appuyer l'origine cosmique de l'asymétrie des molécules du vivant.

Deux hypothèses s'affrontent quant à l'origine de cette asymétrie. Selon la première, la vie serait apparue à partir d'un mélange contenant à parts égales des formes gauches et droites (mélange racémique) ; l'homochiralité serait ensuite apparue au fil de l'évolution. Dans la seconde, en revanche, l'asymétrie aboutissant à l'homochiralité serait antérieure à l'apparition de la vie et viendrait du milieu interstellaire. Cette hypothèse est étayée par la détection d'excès de certains énantiomères d'acides aminés dans des météorites primitives.

Pour vérifier cette hypothèse, les chercheurs ont tout d'abord préparé en laboratoire des échantillons analogues aux glaces interstellaires et cométaires, contenant des molécules non chirales. Ils ont ensuite soumis ces échantillons à un rayonnement ultraviolet polarisé circulairement, produit par le synchrotron *Soleil*, installé près de Paris, afin de reproduire

les conditions régnant dans certains milieux spatiaux. Ces glaces ont ensuite été réchauffées, produisant un résidu organique. L'analyse de ce mélange a révélé qu'il contenait un excès d'environ 1,3 pour cent d'un acide aminé, l'alanine, excès comparable à celui mesuré dans les météorites primitives.

Cette synthèse d'un mélange non racémique de molécules chirales à partir de molécules non chirales conforte l'hypothèse de l'origine interstellaire de l'homochiralité. Un processus astrophysique asymétrique (le rayonnement polarisé des étoiles massives, par exemple) a pu produire des molécules organiques chirales de façon non racémique dès l'origine primordiale, les molécules par la suite importées sur Terre par des comètes et des météorites.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

L. d'Hendecourt et al., *The Astrophysical Journal*, 2010, 712, 1271-1274

Paléontologie

L'oiseau à nunchaku



© N. Longrich / Université Yale

L'oiseau préhistorique *Xenicibis xymptihesus* utilisait ses ailes comme des nunchaku pour battre contre ses congénères.

Bruit. C'est la popularité en Occident du nunchaku, une arme constituée de deux bâtons reliés par une chaîne ou par une corde. La légende veut que l'engin serait dérivé du fléau qu'utilisaient des paysans de l'île d'Okinawa pour décortiquer le riz. En fait, son invention serait bien plus ancienne : selon Nicholas Longrich, de l'Université de Yale, on la doit à un oiseau (*Xenicibis xymptihesus*) de la famille des ibis qui vivait il y a 10 000 ans, uniquement en Jamaïque.

Le paléontologue a étudié plusieurs fossiles récemment mis au jour. Le mâle, de la taille d'une poule et incapable de voler, ressemble beaucoup aux ibis actuels. Cependant, son bréchet est notablement plus large que celui des autres oiseaux non volants. En outre, ses ailes sont plus longues et se terminent par des os longs, fins et incurvés.

La présence de multiples fractures, plaident pour une utilisation de l'aile comme d'une sorte de nunchaku. Les chercheurs suggèrent que les chevaliers. Peine perdue, l'un et l'autre ont disparu...

N. Longrich et S. Olson, *Proceedings of the Royal Society B*, prépublication en ligne, 2011

Paléanthropologie

Une histoire de famille néandertalienne

Pour la première fois, l'histoire familiale d'un groupe de Néandertaliens a été reconstituée. Carles Lalueza-Fox et ses collègues de l'Institut de biologie évolutive de Barcelone ont étudié les fragments osseux de 12 individus mis au jour sur le site d'El Sidrón, dans les Asturies.

D'après l'analyse morphologique des fragments, tous datés d'il y a 49 000 ans, le groupe comprenait trois hommes, trois femmes, trois adolescents, dont au moins deux garçons, et trois enfants de deux à neuf ans, dont le sexe n'a pu être déterminé. Les restes présentent en outre des marques de cannibalisme, ce qui suggère que les individus auraient été dépecés par d'autres Néandertaliens.

Les paléanthropologues ont extrait l'ADN mitochondrial des fossiles et ont séquencé, définissant ainsi plusieurs lignées génétiques maternelles. Ils ont aussi recherché la présence du chromosome Y propre aux mâles humains. Il ressort de cette étude que sept individus appartiennent à une même lignée, qu'il s'agit d'une descendante, et

Divers os, dont une mandibule, retrouvés à El Sidrón.



un seul homme, à une troisième. Les trois femmes étaient toutes d'une lignée maternelle différente, alors que les trois hommes étaient de la même lignée. Deux des femmes, non apparentées aux hommes, étaient sans doute leurs partenaires, et l'une d'elles était la mère de deux des enfants. La troisième femme, de la même lignée maternelle que les trois hommes (une sœur ou une nièce?), aurait mis au monde le troisième enfant.

Il semble que le groupe ait eu un comportement dit patrilocal, c'est-à-dire que les femmes quittaient leurs clans pour rejoindre

ceux de leurs conjoints. Enfin, l'âge des deux jeunes frères suggère qu'ils sont nés à la même époque, un écart comparable à celui observé dans les populations de chasseurs cueilleurs modernes.

Toutefois, on ignore si ces individus sont morts en même temps ou non. Les ossements auraient été rasés et blanchis par des phénomènes géologiques. Mais selon les découvreurs, l'accumulation récurrente au cours du temps d'individus vivants dans le site est et apparentés est peu plausible.

→ Jean-Jacques Perrier

C. Lalueza-Fox et al., *PNAS*, vol. 108, 2011

LES PÉPES D'AMMONITES

Les ammonites sont des céphalopodes (calmars, seiches, poulpes...) qui abondaient dans les mers il y a 200 millions d'années. Cependant, on ignore tout de leurs habitudes et notamment de leur alimentation. Une équipe internationale montre que ces ammonites « déroulées », disparues il y a 65,5 millions d'années, avaient des mâchoires et de longues râpeuses, et se nourrissaient de plancton. Elles sont apparues il y a environ 400 millions d'années, et leur diversité a explosé il y a 200 millions d'années.

LA NAIN ET LE GÉANT

Si les trous noirs supermassifs sont fréquents au cœur des grandes galaxies, on ne pensait pas qu'il pouvait en exister dans les galaxies naines. Amy Reines, de l'Université de Virginie, et ses collègues ont pourtant découvert qu'un spécimen de un million de masses solaires se cache au centre de Henize 2-10, une galaxie irrégulière 50 à 100 fois plus petite que la Voie lactée. Sa présence dans une galaxie à un stade d'évolution peu avancée étaye l'hypothèse selon laquelle ils se développent avant leurs galaxies hôtes.

LA FIN FRAÎCHE CHOCOLAT

Les séquençages du génome de diverses espèces végétales ou animales se succèdent en bon rythme. Les derniers en date concernent le fraisier des bois (*Fragaria vesca*) et le cacaoyer (*Theobroma cacao*). Le génome du fraisier des bois se révèle être constitué de 35 000 gènes environ. Le séquençage du cacaoyer a mis en évidence près de 29 000 gènes ; 2 053 des protéines qu'ils codent semblent spécifiques du cacaoyer.

En bref

LA TÊTE DE HENRI IV

Le 14 mai 1610, Henri IV est poignardé par un vaillanc. Le roi est enterré à la basilique Saint-Denis, mais en 1793, les révolutionnaires profanent son tombeau : la tête commence alors un long périple et disparaît. Après moult péripéties, elle vient d'être retrouvée et identifiée, à partir de nombreuses caractéristiques anatomiques connues, par l'équipe de Philippe Charlier, de l'Hôpital universitaire Raymond Poincaré. Le chef de la tête de Henri IV a été retrouvé tout son royaume.

LE LABRADOR AFFAIBLI

D'après l'analyse des isotopes de l'azote dans les coraux profonds de l'Atlantique Nord, au large de la Nouvelle-Écosse, une équipe suisse suggère que le courant du Labrador a perdu de sa force depuis les années 1970. Ce courant froid, plus riche en azote 15 que les masses d'eau plus chaudes, domine dans les phases négatives de l'Oscillation nord-atlantique, sorte de balancier atmosphérique entre les hautes pressions des Açores et la dépression subarctique. Cette modification ne s'est pas produite au cours des derniers 2 000 ans.

Chimie

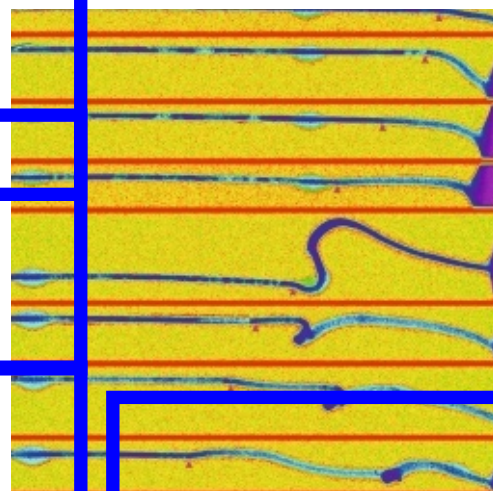
La déformation des nanoélectrodes

Les batteries miniaturisées qui alimentent nos téléphones et ordinateurs portables produiraient au moins 50 pour cent d'énergie supplémentaire si leur anode (leur électrode négative) était à base de silicium, et non de graphite : lorsque l'accumulateur est en charge, la cathode (l'électrode positive) libère des ions lithium qui se joignent à ceux du graphite. Or le graphite ne peut accueillir qu'un ion lithium pour six atomes de carbone, contre quatre pour un atome de silicium dans une anode de silicium.

Cependant, cette propriété du silicium a son revers : en se liant à l'anode dans cette proportion, les ions lithium la déforment, doublant, voire triplant, son volume. Si l'anode retrouve ses dimensions à la décharge, au fil des recharges, les déformations la dégradent et réduisent sa durée de vie. Depuis plusieurs années, les chercheurs tentent d'y remédier.

Pour faciliter ces recherches, des chercheurs du laboratoire Sandia, à Albuquerque, aux États-Unis, et ses collègues ont filmé la déformation de l'anode d'une batterie nanométrique pendant sa recharge.

Leur batterie est expérimentale : une extrémité d'une anode en nanofil d'oxyde d'étain est plongée dans une goutte de liquide conducteur (l'électrolyte), lui-même en contact avec la cathode (en oxyde de lithium-cobalt). L'étain remplace ici le silicium : les chercheurs ont limité le stockage à deux ions lithium par atome d'étain, ce qui suggère que la déforma-



Déformation d'une anode en nanofil d'oxyde d'étain (en bleu) pendant les 20 premières minutes de charge d'une batterie [observée en microscopie électronique à transmission].

tion se voit amplifiée avec le silicium. Dès les premières secondes de charge, le nanofil se bosselle, puis s'entortille, s'allonge et s'élargit. Certes, la géométrie de la batterie est particulière : l'électrode n'a qu'une dimension et la réaction n'a lieu qu'à son extrémité.

Malgré ces limitations, ces images offrent un aperçu de plusieurs déformations possibles et leur enchaînement ; ils offrent ainsi une méthode précise pour tester la déformation des nouveaux matériaux.

→ Marie-Neige Cordonnier

Science, vol. 330, pp. 1515-1520, 2010
Y.-M. Chiang, Science, vol. 330, pp. 1485-1486, 2010

Neurobiologie

Soulager la douleur chronique

Les douleurs chroniques persistent plusieurs mois, voire des années, même quand la cause de la douleur a disparu. Pourquoi ? Parce que dans le cerveau, les signaux de la douleur modifient les connexions synaptiques entre les neurones des centres de la douleur, de sorte que ces neurones restent actifs des mois après la blessure.

Cette plasticité cérébrale engendre une forme de mémoire de la douleur. Xiang-Yao Li, du Centre d'étude de la douleur à l'Université de Toronto au Canada, et ses collègues ont réussi à soulager la douleur chronique chez la souris, en inhibant une

enzyme clé du mécanisme de mémorisation.

Plusieurs molécules, notamment des enzymes kinases, participent à la plasticité synaptique, c'est-à-dire à la création de nouvelles connexions entre neurones et au renforcement ; c'est le cas de la protéine kinase M zêta. Elle maintient durablement les modifications synaptiques dans divers régions du cerveau. Le cortex cingulaire antérieur est l'un des centres cérébraux impliqués dans la douleur chronique.

Les neurobiologistes ont donc mesuré l'activité de cette enzyme dans le cortex cingulaire antérieur de souris dont ils avaient au préa-

lablement endommagé un nerf périphérique. Ils ont constaté que cette enzyme est activée par la blessure et que l'activation persiste plus de 20 jours après le stimulus, et ce, uniquement dans cette région du cortex. En outre, en inhibant cette enzyme avec une molécule nommée ZPP (injectée directement dans le cortex cingulaire antérieur), les neurobiologistes ont constaté que les souris ne présentent plus de douleur et que les modifications synaptiques entre neurones corticaux disparaissent.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Xiang-Yao Li et al., Science, vol. 330, pp. 1100-1104, 6 décembre 2010



Psychologie

Des larmes qui éteignent la flamme des hommes

Avec les larmes, il y a deux choses qui servent les hommes : plusieurs rôles physiologiques ont été proposés, par exemple l'évacuation de substances toxiques ou la protection des yeux. Cependant, la fonction psychologique et sociale des larmes émotionnelles, celles qui coulent lors d'une sensation intense, de joie ou de tristesse, restait inconnue. Shani Gelstein, de l'Institut Weizmann, à Rehovot, en Israël, et ses collègues ont révélé qu'elles contiennent un signal chimique qui influe sur le comportement sexuel.

Les biologistes ont collecté les larmes émotionnelles de deux femmes ayant regardé des films dramatiques et ont montré qu'on

ne peut pas ignorer l'odeur de ces larmes, de celle du liquide qui baigne l'œil en conditions normales. Elles se sont ensuite intéressées à l'effet de ces larmes émotionnelles sur des hommes qui les avaient inhalées. Plusieurs observations ont été faites.

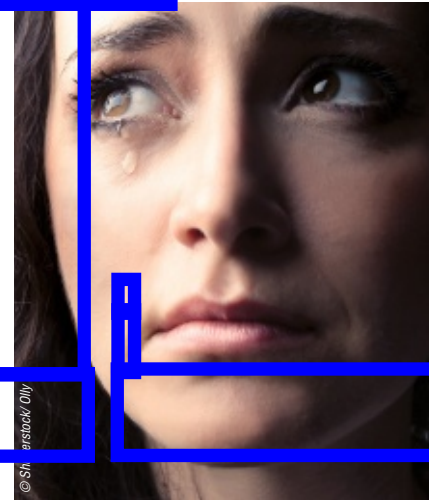
D'abord, ces larmes diminuent l'attraction sexuelle : c'est ce qui ressort de questionnaires standardisés remplis par des hommes à qui on avait présenté des visages de femmes. En outre, d'autres mesures ont mis en évidence une réduction de la quantité de testostérone, l'hormone mâle par excellence (même si les femmes en produisent aussi). Enfin, l'imagerie cérébrale a mon-

tré que les larmes émotionnelles diminuent l'activité des aires cérébrales liées à l'excitation sexuelle.

S. Gelstein et ses collègues ont découvert que les larmes liées à une émotion forte contiennent une substance, encore inconnue, de type phéromone, qui module le comportement des hommes, notamment en limitant le désir sexuel. Jules César, le poète latin de la fin du 1^{er} siècle, ne disait pas autre chose : « La nature prouve qu'elle nous veut du bien, qu'en nous donnant les larmes elle nous donne le meilleur : la sensibilité ».

→ L. M.

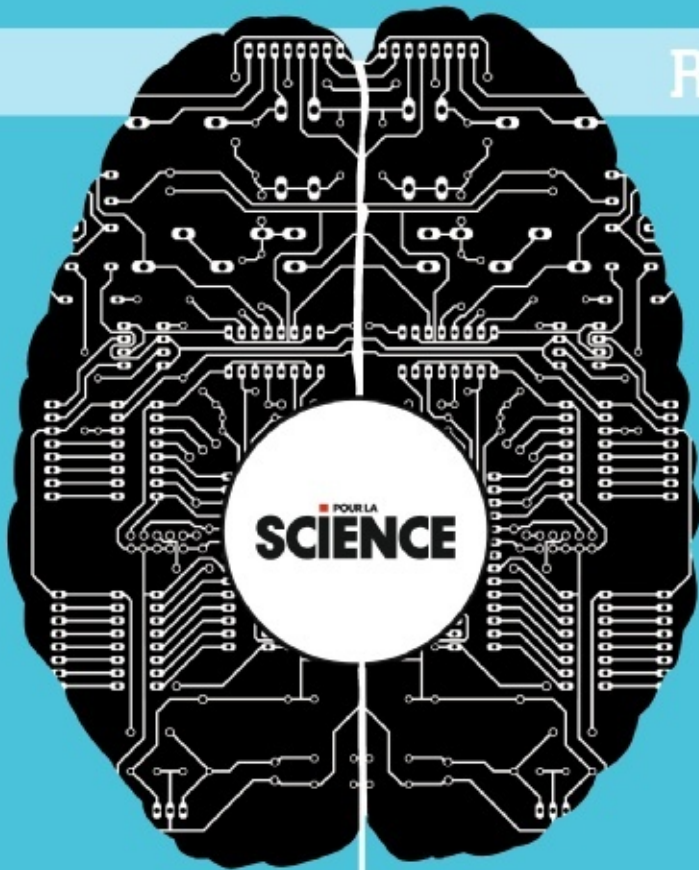
S. Gelstein et al., *Science*, prépublication, 6 janvier 2011



Les larmes d'une femme diminuent le désir sexuel des hommes.

RESTEZ CONNECTÉ !

Restez en contact avec l'actualité scientifique :
Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web.



-  Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
-  Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourlaScience>
-  Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
-  Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
-  Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

Archéologie

L'archéologie éphémère de Formby

À la pointe de Formby, le livre du temps se lit dans l'argile. En ce lieu, on vient de retrouver des traces de pas vieilles de 5000 ans ; elles ont pu être relevées juste à temps, avant que la mer ne les efface comme elle l'avait fait pour les couches d'argile précédentes.

Ce ne sont ni les premières du genre ni les plus anciennes, puisque de mystérieuses traces de pas ont été observées à Formby depuis les années 1900. Depuis 1989, plus de 200 pistes humaines ont ainsi pu être enregistrées avant que la mer ne les détruise ; à cela s'ajoutent des centaines de traces d'aurochs, de cervidés, de chevaux sauvages,

de loups, d'ovidés et de caprinés sauvages... Ces données livrent petit à petit des informations originales : ainsi, une étude de 75 pistes réalisée en 1995 a révélé que les hommes qui foulèrent la plage de la pointe de Formby mesuraient en moyenne 1,66 mètre, tandis que les femmes ne mesuraient que 1,45 mètre. Les traces indiquent la présence fréquente de femmes et d'enfants venus sur la plage ramasser des coquillages, des crevettes, etc. Les pistes des hommes sont pour la plupart associées à celles de

une vitesse plus élevée, ce qui suggère qu'elles ont été laissées par des chasseurs.

→ François Savatier

L'une des empreintes de pied relevées numériquement (datant d'environ 5 000 ans).

Médecine

L'aspirine pour prévenir les cancers ?

Une équipe coordonnée par Peter Kouwten, de l'Université d'Oxford, a confirmé que l'aspirine diminue le risque de développer des tumeurs cancéreuses, et d'en mourir. Les chercheurs ont examiné les données de mortalité par cancers de 25 570 personnes ayant reçu chaque jour de l'aspirine. Le nombre de décès dans les groupes traités était de 10,5 %, contre 14,5 % chez ceux qui n'avaient pas pris d'aspirine, soit une réduction de 34 %, en moyenne, par rapport aux groupes prenant un placebo. Cet effet augmente avec la durée du traitement, mais pas avec la dose d'aspirine (75 milligrammes par jour suffisent).

Une vingtaine de mécanismes seraient impliqués dans cet effet anticancéreux, d'après Robert Benamouzig, gastroentérologue à l'Hôpital Avicenne, à Bobigny, et l'un des promoteurs de l'étude APACC (Association pour la prévention par aspirine du cancer colorectal), lancée en France en 1997. Certains des personnes ayant un risque potentiel de cancer pourront, à terme, bénéficier de cette chimioprévention.

→ J.-J. P.

P. M. Rothwell et al., *Lancet*, vol. 377, pp. 31-41, 2011

Climatologie

Aérosols atmosphériques : une question de taille

Les poussières minérales en suspension dans l'atmosphère ont un impact sur le climat, en raison de leurs interactions avec les nuages, les écosystèmes et le rayonnement. C'est un élément d'incertitude dans la modélisation climatique, en particulier parce que la taille des particules minérales émises dans l'atmosphère est mal connue. Or Jasper Kok, du Centre américain de recherche atmosphérique, à Boulder, a déterminé la répartition en tailles des particules minérales d'aérosol émises.

Les poussières minérales diffusent ou absorbent le rayonnement, et modifient les propriétés des nuages. Par ailleurs, en se déposant sur les océans, elles influent sur la productivité des écosystèmes marins et la quantité de dioxyde de carbone emmagasinée dans les mers. Tous ces processus dépendent de la taille des particules de poussière, qui détermine aussi la durée de leur séjour dans l'atmosphère.

Kok a surtout étudié les particules de diamètre inférieur à 20 micromètres, les plus importantes parce qu'elles peuvent rester longtemps dans l'atmosphère. Elles ne sont pas emportées directement par le vent. En fait, ce sont des particules plus grosses (entre 70 et 500 micromètres de diamètre)

que le vent emporte, leurs forces de cohésion étant plus faibles que les forces aérodynamiques. Quand elles heurtent le sol, elles éjectent des particules de poussière fine. De plus, les grosses particules sont des agrégats de petites particules qui se fragmentent lors du choc avec le sol.

J. Kok s'est fondé sur un processus bien compris, la fragmentation des matériaux fragiles (comme le verre ou le gypse). Pour des énergies d'impact assez élevées, ces matériaux se fragmentent en particules de tailles très diverses, où la taille maximale est petite comparée à celle du morceau initial. Cette fragmentation suit une loi de puissance : le nombre de fragments de taille x est proportionnel à une certaine puissance négative de x (D). Les résultats de J. Kok, fondés sur cette loi, sont en accord avec les mesures de terrain disponibles. Il conclut notamment de son étude que les modèles de circulation atmosphérique surestiment le refroidissement dû à une quantité donnée de poussières. Par conséquent, sous-estiment leurs émissions globales et leur impact sur les océans.

→ Maurice Mashaal

J. F. Kok, *PNAS*, prépublication en ligne, décembre 2010



Les particules de poussières minérales en suspension dans l'atmosphère (ici une tempête de sable dans le désert) influent sur le climat.

Assurance vie : alliez performance et sécurité !

L'assurance vie demeure le produit d'épargne préféré des Français. Dans la multitude des contrats présents sur le marché, la GMF se distingue par des solutions offrant rendement et sécurité.



SEREC Communication - Photo Getty Images - GMF Vie : 76 rue de Prony, 75857 Paris cedex 17

La crise financière n'entame pas la confiance des Français dans l'assurance vie ! Les cotisations collectées au 1^{er} semestre 2010 par la GMF sont en hausse de 17% par rapport à la même période de l'année précédente. Rien d'étonnant à cela lorsqu'on constate les taux servis par la GMF en 2009 et qui sont parmi les meilleurs du marché. Le rendement de ses contrats et supports d'assurance vie en euros a atteint 4,15%⁽¹⁾.

Un taux non seulement supérieur à la moyenne du marché, qui n'excède pas 3,70%⁽²⁾

en 2009, mais aussi beaucoup plus intéressant que ceux désormais offerts par les livrets d'épargne traditionnels. Ainsi, alors que ces livrets classiques garantissent à l'épargnant la sécurité contre un faible rendement, le contrat Altinéo de la GMF, lui, offre sécurité et performance. Vous profitez d'un taux minimum garanti chaque année, les intérêts vous sont définitivement acquis et génèrent eux-mêmes d'autres intérêts. De plus, vous investissez sans plafond, tout en profitant d'une fiscalité privilégiée. Profitez-en !

UNE PERFORMANCE RÉCOMPENSÉE

Depuis 2000, le contrat d'assurance vie en euros Compte Libre Croissance – aujourd'hui remplacé par Altinéo, un produit qui offre des caractéristiques et un niveau de performance similaires – a offert à l'épargnant un rendement moyen de 4,48%⁽³⁾ par an, soit plus de 36,84%⁽⁴⁾ sur 8 ans. C'est pour distinguer notamment la régularité de ses performances que les experts des Dossiers de l'Épargne ont, en 2010, décerné pour la troisième année consécutive le label d'excellence à Altinéo.

Didier Ledeur, Directeur Général de la GMF VIE

« Une expertise qui profite directement aux épargnants »

« La GMF propose une large gamme de produits d'assurance vie, d'épargne et de placement depuis maintenant plus de 30 ans. C'est cette expertise, constituée au fil des ans, qui lui permet aujourd'hui d'afficher d'excellents résultats, et ce malgré un environnement économique et boursier plus difficile. L'épargnant en bénéficie directement, comme il tire profit des valeurs mutualistes qui animent au quotidien l'entreprise : refus des effets d'annonce, absence de taux « boostés » à court terme pour recruter de nouveaux clients... Sans oublier une solide santé financière, un élément indispensable dans le contexte actuel. »

Pour en savoir plus :
appelez le 0 820 809 809
(0,12€ TTC/mn) ou consultez
le site www.gmf.fr



Assurément Humain

(1) frais de gestion déduits, avant prélèvements sociaux.

(2) source : Fédération Française des Sociétés d'Assurances, estimation au 23.6.10.

(3) taux de rendement annuelisé du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux.

(4) taux de rendement du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion et prélèvements sociaux déduits.

Environnement

MICELLES ORDONNÉES

Structures ordonnées à grande distance, mais non périodiques, les quasicristaux étaient observés dans des alliages métalliques et des mélanges de nanoparticules ou de polymères. Des chercheurs ont détecté dans une solution de micelles, agrégats spontanés de molécules. Dans certaines conditions, ces micelles s'organisent en un quasicristal stable dont la figure de diffraction présente une symétrie d'ordre 18, jamais observée dans des quasicristaux. Elles pourraient ouvrir de nouvelles voies en photonique.

FLORE MENACÉE

Sur l'île de la Réunion, parmi toutes les espèces végétales répertoriées 49 (5,4 pour cent) ont disparu en quelques décennies et 275 autres (30,4 pour cent) sont menacées de disparition. Sur 1 005 espèces indigènes de fougères et de plantes à fleurs, 231 sont endémiques : leur disparition de la surface de la Terre serait donc définitive. Comme souvent, la destruction et la dégradation des habitats naturels sont en cause. Cet état des lieux vise à faire évoluer les mesures de protection de la flore de l'île.

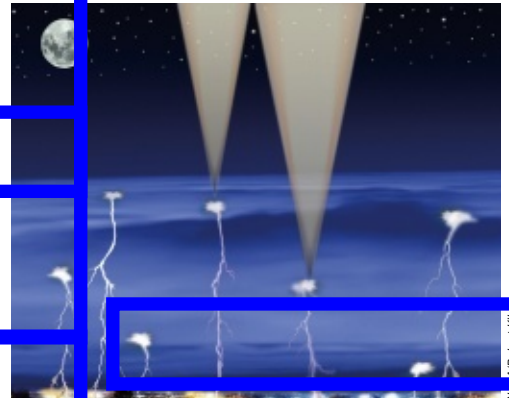
Géophysique

Des rayons gamma dans les orages

Un orage produit non seulement des éclairs, mais aussi, au-dessus des nuages, toutes sortes d'émissions lumineuses fugitives que l'on étudie depuis 20 ans. Mais ce n'est pas tout. À partir de 1994, les satellites dédiés à la mesure des rayons gamma dans l'espace ont détecté parfois, au-dessus d'orages, des flashes comparables aux émissions cosmiques, dont l'énergie peut atteindre 30 mégaelectronvolts.

On pensait que ces flashes résultaient des collisions des rayons cosmiques (particules de haute énergie en partie émises par le Soleil et circulant dans l'espace) sur les molécules des nuages : une rafale de rayons cosmiques arracherait des électrons aux molécules supérieures du nuage ; accélérés par le champ électrique puissant créé par la répartition des charges du nuage (positives en haut, négatives en bas), ces électrons, projetés vers l'ionosphère, émettraient des rayons gamma. Mais ce scénario, avec les molécules de l'air. Mais les dernières mesures de la mission spatiale italienne AGILE remettent en cause ce scénario.

Le satellite AGILE a détecté des flashes gamma de 100 mégaelectronvolts, des énergies trop hautes pour être expliquées par ce modèle. D'autres pistes sont envisagées : selon Elisabeth Blanc, géophysicienne au Commissariat à l'énergie atomique, les sylphes, un



M. Robert Kitz

Outre les éclairs, les nuages orageux émettent parfois des flashes de rayons gamma vers l'ionosphère.

des types d'émissions lumineuses visibles au-dessus des nuages, présentent des zones où l'on observe une forte accélération des électrons, qui pourrait leur conférer une énergie cinétique suffisante pour expliquer les flashes, dont il existe peut-être plusieurs types.

Aujourd'hui, les données sont insuffisantes pour conclure, mais le Centre national d'études spatiales vient d'approuver la construction du satellite TARANIS, dédié à la détection de toutes les émissions associées aux orages. Cela permettra de mieux comprendre les mécanismes physiques en jeu et d'évaluer leur impact. Les mesures devraient commencer en 2015.

M. N. C.

M. Tavani et al., *Physical Review Letters*, vol. 106, 018501, 2011

Sociologie

Les néonaticides sous-estimés en France

La mort de tout jeunes nourrissons défraie parfois la chronique, quand, des années après le crime, on découvre leur corps au fond d'un jardin ou dans un congélateur. On parle de néonaticide lorsque l'enfant est âgé de moins d'une journée lors de son décès. Ces infanticides sont souvent associés au déni de grossesse, à savoir que la mère n'a pas conscience d'être enceinte. Mais combien de nourrissons sont concernés chaque année ?

Anna Tursz et Jon Cook, du Centre de recherche médecine, sciences, santé, société et société (Unité INSERM 988), révèlent les premières données françaises sur les néonaticides. Ils ont

analysé les dossiers judiciaires de trois régions françaises entre 1996 et 2000 et recueilli les données correspondantes. Ils ont caractérisés les caractéristiques sociales et psychologiques des mères auteurs de ces actes.

Dans les statistiques officielles de mortalité (établies par l'INSERM à partir des certificats de décès), les néonaticides concerneraient 0,39 naissance sur 100 000. Les chercheurs rapportent quant à eux 2,1 néonaticides sur 100 000 naissances, soit 5,4 fois plus. Dans cette étude, les mères avaient en moyenne 20 ans, 17 étaient célibataires, 11 étaient en couple, et le tiers d'entre elles avaient déjà trois enfants. Elles ne souffraient d'aucune maladie

mentale. En revanche, elles avaient peu confiance en elles, présentaient des carences affectives, une forte dépendance à l'autre, voire une peur de l'abandon. Elles n'utilisaient pas de contraception, cachaient leur grossesse à leur famille et ne se faisaient pas suivre durant leur grossesse. Elles accouchaient souvent seules. Mais aucun déni de grossesse n'a été mis en évidence. Bien qu'il semble difficile de dresser un profil des femmes qui auraient commis ces actes, il est important de noter que ces femmes ne sont pas forcément très jeunes, célibataires, seules et sans emploi.

B. S.-L.

A. Tursz et J. Cook, *Archives of Disease in Childhood*, 2011



En France, les infanticides de nourrissons âgés de moins de 24 heures sont plus fréquents qu'on ne le croyait.

© Shutterstock / mairisy Tahana

Forum

Horizon Chimie

25^e édition

2 et 3
février 2011
à partir de 10 h

Maison de la Chimie

28 bis, rue Saint-Dominique

75007 PARIS

> métro Invalides

Renseignements :

01 45 35 41 82

www.horizon-chimie.fr

LA SÉLECTION DE SCIENCE POUR LA

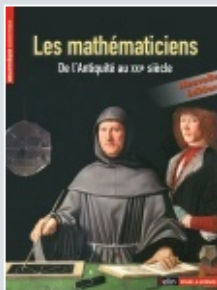
Des livres à offrir ou à s'offrir



Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT. Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

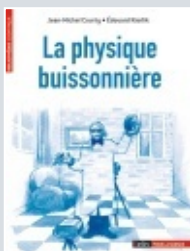
075107 • 288 pages • 24 euros



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kovalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

075109 • 280 pages • 24 euros



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

075105 • 160 pages • 22 euros



Maux d'artistes • Sebastian Dieguez

Existe-t-il des liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur ? Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de psychologue, neurologue, voire de psychiatre, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres : Dostoïevski, Monet, De Chirico, Proust, Van Gogh, etc.

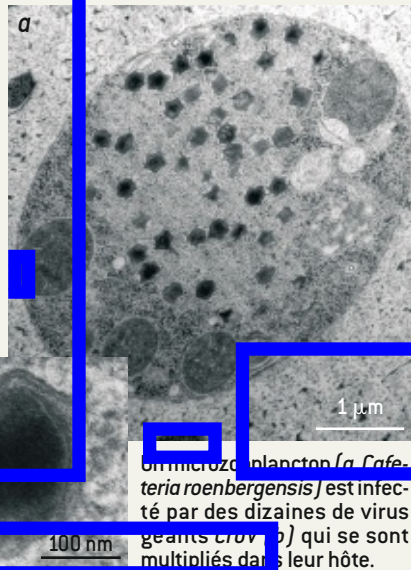
075101 • 126 pages • 25 euros

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ UN NOUVEAU GROS VIRUS

Selon la définition qui fait encore référence à la taille, un virus a une petite taille (une de ses dimensions est inférieure à 250 nanomètres), n'a qu'un type d'acide nucléique (ADN ou ARN) en guise de génome, n'a pas les enzymes nécessaires pour produire de l'énergie et est incapable de se multiplier seul par division; il parasite donc d'autres cellules. Mais en 2003, la découverte de *Mimivirus*, un virus de plus de 400 nanomètres de diamètre, contenant 1,2 million de bases et possédant de l'ADN et de l'ARN, bouleverse la conception des virus (voir *Mimivirus: le plus gros des virus*, *Pour la Science*, janvier 2006, <http://bit.ly/plsoer339>). Des biologistes de Vancouver viennent de le découvrir dans les océans: un nouveau virus géant nommé CroV (PNAS, novembre 2010). Il infecte une espèce de micro-zooplankton (*Cafeteria roenbergensis*) et est le plus grand virus marin jamais observé. Son génome contient 788 308 paires de bases et code certaines des

protéines nécessaires à la réplication de l'ADN – et donc à la multiplication du virus. En général, les virus trouvent ces protéines dans les hôtes qu'ils infectent pour se multiplier. Un tiers de ses gènes serait commun à ceux de *Mimivirus* et, comme *Mimivirus*, son origine est débattue.



→ DES TROUS NOIRS

DE L'UNIVERS AUX TROUS NOIRS ARTIFICIELS

Un trou noir est un objet massif dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper. En deçà d'une limite nommée horizon, les rayons lumineux sont piégés. À l'extérieur de cette limite, leur trajectoire est modifiée, mais ils peuvent s'échapper. Les seules observations des propriétés des trous noirs dans l'Univers remontent à des milliers ou des millions d'années. La lumière, ce qui n'est pas simple! Les physiciens tentent donc de recréer des « trous noirs » en laboratoire.

Ainsi, comme la propagation du son dans un fluide en mouvement est semblable à celle de la lumière dans un espace-temps courbe, des physiciens conçoivent des « trous noirs acoustiques » ayant des propriétés analogues à celles des trous noirs de l'Univers. Pour ce faire, ils utilisent une conduite cylindrique conçue pour accélérer le fluide à une vitesse supersonique. Les trajectoires suivies par les ondes sonores dans ce dispositif correspondent à celles des ondes lumineuses dans les régions internes et externes d'un trou noir (voir *Les trous noirs acoustiques*, *Pour la Science*, mai 2002).

Des physiciens chinois viennent de créer en laboratoire des trous noirs artificiels électromagnétiques (*Journal of Applied Physics*, novembre 2010). Ils ont utilisé cinq matériaux isotropes – des matériaux artificiellement structurés aux propriétés inhabituelles, absentes dans la nature –, disposés en couches, de sorte que, grâce à leurs propriétés magnétiques, ils piègent les ondes électromagnétiques. Et ce trou noir électromagnétique ne laisse pas s'échapper les micro-ondes qui y pénètrent. Ce dispositif permettrait peut-être de mieux comprendre comment la lumière est absorbée dans un trou noir.

→ LE CERVEAU DES BÉBÉS NE S'ARRÊTE JAMAIS

Depuis une dizaine d'années, on sait que le cerveau humain adulte reste actif lorsqu'il est au repos, par exemple en état de somnolence. Et de façon étonnante, l'énergie alors consommée est environ 20 fois supérieure à celle utilisée quand le cerveau réagit consciemment (lors d'une tâche par exemple). Cette activité cérébrale de repos, nommée le mode par défaut, serait indispensable à la planification de tâches et à la prise de décision, et assurerait la cohérence des pensées et l'introspection, qu'il s'agisse de se souvenir du passé ou d'imaginer le futur. Elle repose sur un réseau de régions cérébrales, notamment le cortex préfrontal médian, les cortex pariétaux médian et latéral et le cortex temporal latéral (voir *Un cerveau jamais au repos*, *Pour la Science*, juillet 2010, <http://bit.ly/plsoer393>). On pensait jusqu'alors que ce réseau du mode par défaut était inexistant chez les bébés et se mettait en place dans la petite enfance. Il n'en est rien. Des neurobiologistes à Londres ont enregistré l'activité cérébrale de 70 bébés inactifs, nés entre 29 et 43 semaines de grossesse sous sédatifs ou non (PNAS, novembre 2010). Au repos, leur cerveau est actif et le réseau du mode par défaut est déjà présent quand le bébé à 30 semaines de développement; ce réseau est complet à 40 semaines (au moment où la plupart des bébés naissent). Et ce, que les bébés soient sous sédatifs ou non. Le cerveau des bébés est donc plus développé qu'on ne l'imaginait, et soit les bébés sont déjà capables d'imaginer le futur et de planifier des tâches – ce qui est peu probable! –, soit d'autres fonctions du mode par défaut restent à découvrir...

→ Bé

VOS PRIVILÈGES AU SOMMET

1 an • 12 numéros

56 € seulement
au lieu de 74,70 €



Recevez chaque mois votre magazine en version papier
et consultez sa version numérique en format PDF sur www.pourlascience.fr

SCIENCE

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 01

- ☐ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* seul** (12 n°s et leur version numérique)
1 an • 56 € au lieu de 74,70 € Participation aux frais de port : Europe (hors France métropolitaine) 12 € par an, autres pays 25 € par an.
- ☐ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* version web** (12 n°s)
1 an • 48 €
- ☐ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* (12 n°s et leur version numérique) + les *Dossiers* (4 n°s et leur version numérique)**
1 an • 76 € au lieu de 109,50 € Participation aux frais de port : Europe (hors France métropolitaine) 16 € par an, autres pays 25 € par an.

- ☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*
☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*

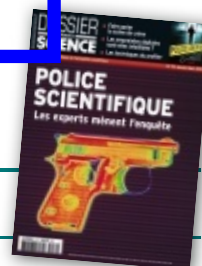
Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____
Pays : _____ Tél. : _____
E-mail : _____

Je règle par :

- ☐ Chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire

Numéro de la carte : _____
Date d'expiration : _____
Code de sécurité : _____
Signature obligatoire : _____



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

* prix en kiosque ** facultatif *** Merci d'inscrire les 3 chiffres figurant au dos de votre carte

POINT DE VUE

Le Mont-Saint-Michel restera une île. À quel prix ?

Le barrage qui retient l'eau d'écoulement du Couesnon et des marées hautes est périodiquement vidé pour évacuer les sédiments qui menacent l'insularité du Mont. Après un an d'utilisation, le bilan est plutôt positif... sauf pour les touristes.

Fernand VERGER

« Le Mont-Saint-Michel est pour la France ce que la grande pyramide est pour l'Égypte. Il faut que le Mont-Saint-Michel reste une île. Il faut conserver à tout prix cette double œuvre de la nature et de l'art. »

Cette requête véhémente de Victor Hugo date de 1884, cinq ans après la construction d'une digue qui fit du Mont-Saint-Michel une presqu'île. Depuis lors, se pose une question récurrente : comment faire pour que le Mont reste une île ? De nombreux projets ont échoué, jusqu'à ce que des travaux visant à préserver cette insularité soient décidés en mars 1995.

D'immenses volumes de sédiments charriés par la mer s'accumulent inégalement, menaçant l'insularité du Mont. Les récents travaux entrepris visent à utiliser le Couesnon, un petit fleuve côtier qui se jette dans la baie, pour entraîner les sédiments vers le large. Le Couesnon a un débit moyen annuel de 10 mètres cubes par seconde, ce qui est insuffisant pour dégager les abords du Mont de la tange qui s'accumule. Pour y parvenir, il faudrait des débits de l'ordre de 100 mètres cubes par seconde, ce qui représente les rares débits de crue. Afin d'obtenir des chasses puissantes, un nouveau barrage a été construit à l'endroit où le Couesnon se jette dans la baie. Il a été achevé en 2009.

Après une année de fonctionnement — partiel comme nous le verrons —, dressons un premier bilan. En premier lieu, l'évacuation du sable, elle est conforme aux

prévisions et l'impact sur la biodiversité locale est positif. En revanche, force est de constater que les courants modifient le lit des rivières qui sillonnent la baie, en augmentent notablement le débit, et perturbent les ranniers de la baie.

Avant de revenir sur ces différents aspects, rappelons en quoi consiste le dispositif. Le barrage construit sur le Couesnon retient l'eau du fleuve et emmagasine des eaux à marée haute. Les eaux ainsi retenues sont lâchées à marée basse. Il est prévu deux bras d'évacuation passant de part et d'autre du Mont, mais aujourd'hui

LE FONCTIONNEMENT DU BARRAGE assure aujourd'hui un déblaiement efficace du chenal.

seul le plus important des deux, qui assurera 70 pour cent du débit lorsque le projet sera achevé, fonctionne. Il passe à l'Ouest du Mont. La digue qui unit le Mont au continent fait encore obstacle à l'écoulement du bras coulant à l'Est du Mont. Vers 2015, la digue qui supporte la route sera remplacée par un pont qui permettra l'écoulement du bras oriental du Couesnon et l'accès au Mont par un court quai submersible lors des plus grandes marées, qui présentera un intérêt symbolique : garantir le caractère insulaire du monument.

Le fonctionnement du barrage sur le seul bras occidental assure aujourd'hui un déblaiement efficace du chenal jusqu'en aval du Mont. Les chasses sont beaucoup plus violentes qu'auparavant. Leur vitesse est cependant volontairement limitée à 100 mètres

cubes par seconde, d'une part, parce que le dispositif est encore en phase d'étude et d'autre part, pour limiter les risques pour les touristes de la baie (nous y reviendrons).

Le volume actuel de la retenue est de l'ordre de 300 000 à 500 000 mètres cubes. Pour accroître ce volume et pratiquer des chasses plus importantes lorsque les deux bras du Couesnon seront en service, l'anse de Moidrey, une ancienne boucle de méandre du Couesnon aujourd'hui comblée, sera creusée, tout comme le lit du Couesnon en amont du barrage. Dans les études préliminaires, on avait envisagé que ce volume atteindrait jusqu'à 1 200 000 mètres cubes.

Par son ampleur, un tel projet présente inévitablement sur l'environnement. Contrairement à l'ancien barrage, le nouveau ne constitue pas une cloison entre le milieu marin et le milieu fluvial, puisque les eaux de mer s'accumulent dans la réserve, entraînant une salinisation du cours inférieur du Couesnon. Le franchissement du nouveau barrage par les poissons anadromes, qui doivent remonter les fleuves pour s'y reproduire, a été facilité par deux passes à poissons ménagées aux deux extrémités du barrage qu'utilisent notamment les saumons atlantiques. Le même franchissement est possible pour les poissons catadromes, telles les anguilles, qui pénètrent à l'état de civelles dans le Couesnon où elles vont grossir avant de franchir une nouvelle fois le barrage et rejoindre la mer des Sargasses pour y frayer.

L'anse de Moidrey a dû être débarrassée de sa peuplerye avant que n'y soient

creusés de nombreux chenaux devant recevoir les eaux saumâtres de la réserve d'eau destinée aux chasses. Cette opération risquait de détruire des amphibiens nommés péloclites ponctués, une espèce protégée au plan national et qui vivait dans cette anse. Afin d'éviter cette perte de biodiversité, une des premières opérations entreprises dès 2005 par le Syndicat mixte Baie du Mont-Saint-Michel, maître d'ouvrage du projet, a consisté à déplacer ces amphibiens pour les installer dans de nouvelles mares créées à cet effet. D'autres parties du projet consistent à supprimer le vaste parking établi sur les grèves. Ces dernières retrouveront leur aspect naturel et les marées hautes pourront pourrir sur ce rivage de tange une faune d'invertébrés marins que les sols durs du parc de stationnement avaient éliminée.

Si, comme nous l'avons montré, le dicton selon lequel la mer monte dans la baie à la vitesse d'un cheval au galop est faux, il n'en demeure pas moins que les promeneurs qui s'aventurent dans la baie doivent être vigilants : les horaires des marées doivent être impérativement consultés. S'y ajoutent désormais les horaires de la programmation des chasses. Lorsque l'eau retenue par le barrage est libérée, elle envahit le chenal de Couesnon dans la baie avec une rapidité et un débit surprenants. La mise en fonctionnement du second chenal et l'augmentation du volume des chasses ne feront qu'augmenter les risques. Des panneaux d'avertissement ont été installés. Or les horaires des chasses ne sont annoncés qu'un jour ou deux à l'avance, de sorte que les programmations des sorties dans la baie sont rendues difficiles.

Ainsi, les préoccupations écologiques ont été prises en compte dans ce vaste programme destiné à restaurer l'insularité du Mont-Saint-Michel pour plusieurs décennies et qui devait s'achever en 2015. Reste à améliorer la prise en compte des touristes tant ceux qui veulent explorer la baie à pied que ceux qui veulent pouvoir se garer à proximité du Mont : l'aménagement de parkings de stationnement éloignés du site de départ des futures navettes suscite déjà de vives critiques. Jusqu'à présent l'abbaye attire chaque année près de deux millions de visiteurs. Continueront-ils à venir aussi nombreux ?

Fernand Verger, géographe et professeur émérite de l'école normale supérieure.

www.pourlascience.fr

ÉCONOMIE

Responsable et coupable

Dans les années 1930, la thésaurisation excessive (responsabilité) de l'or dans la Banque de France a diminué la monnaie en circulation, et la passivité du gouvernement (culpabilité) a accentué les effets de la Grande Dépression

Ivar EKLUND

C'est toujours un plaisir de savoir qu'on a eu quelque influence sur la marche du monde, même si la reconnaissance arrive 80 ans après les faits. Nos compatriotes seront sans doute heureux d'apprendre que le responsable de la grande crise économique des années 1930 a enfin été identifié : c'est la France.

Rapportons les faits. Le 29 octobre 1929 (*Black Tuesday*), Wall Street s'effondre, marquant ainsi la fin de l'euphorie boursière des années 1920. Il faudra attendre 1954 pour que les cours retrouvent leur niveau de mi-1929. Entre 1929 et 1932, la production industrielle aux États-Unis chute de



moitié, et le taux de chômage est multiplié par six. La France, la Grande-Bretagne et l'Allemagne emboîtent le pas, et la valeur des échanges internationaux est divisée par trois. C'est la dépression : l'argent manque, et la production ne baisse jamais assez pour rattraper la consommation.

Pourquoi un krach boursier aux États-Unis s'est-il transformé en une crise économique mondiale, et surtout pourquoi a-t-elle duré si longtemps ? On s'accorde aujourd'hui à penser que la cause profonde était monétaire. Depuis 1922, les économies développées étaient revenues à l'étalon or : pour chacun de ces pays, la quantité totale de monnaie nationale en circulation ne devait

pas excéder un certain multiple de la quantité d'or détenue dans les coffres de la Banque centrale. En 1928, les réserves d'or des États-Unis représentaient 60 % de la monnaie en circulation ; cette proportion était de 40 % en France et de 30 % en Grande-Bretagne.

Évidemment, si ces proportions sont rigides, on ne peut pas augmenter la quantité de monnaie en circulation si l'on n'augmente pas les réserves d'or de la Banque centrale. À échelle mondiale, une croissance normale de l'activité économique, disons de trois pour cent par an, impose donc une augmentation régulière de la quantité d'or produite, ou du moins un transfert de l'or existant des coffres des bijoutiers vers ceux des banquiers. Cela avait fait craindre à certains économistes une pénurie d'or, qui ne s'est pas manifestée : entre 1928 et 1933, les réserves mondiales ont augmenté de 20 %. Il y avait largement de quoi financer une reprise économique. Pourquoi n'a-t-elle pas eu lieu ?

Parce que cet or est allé directement dans les coffres de la Banque de France. En 1932, celle-ci détenait 27 % des réserves mondiales,

alors que les États-Unis, avec une économie quatre fois plus importante, en détenaient 14 %. À titre de comparaison, en 1928, les proportions respectives étaient de 12 et 38 %. Cela n'aurait pas été bien grave si cet or avait servi à créer de la monnaie, comme c'était sa fonction. Mais la Banque de France s'est contentée de l'entasser dans ses caves, sans mettre un franc de plus en circulation. Alors que le loi de finance de 1928 imposait un taux de couverture minimal de 35 %, on en était à 30 % dès 1928, 51 % en 1931 et 80 % en 1932. Si l'on tient compte des autres avoirs de la Banque, le taux de couverture dépassait 100 % : il y avait autant de réserves dormant dans les coffres que de francs en circulation. La France aurait pu se passer d'émettre de la monnaie et régler ses transactions directement en or. En 1932, l'excès de ses réserves, par rapport au taux légal de 35 %, représentait 13 % du stock d'or mondial.

Cette situation n'avait pas échappé aux contemporains, notamment à Keynes qui écrivait : « Quand le dernier lingot d'or du monde aura été soigneusement rangé à la

Banque de France, ce sera le bon moment pour le gouvernement allemand d'annoncer qu'un de ses chimistes a trouvé le moyen de produire de l'or à six sous le kilogramme. » Mais ce n'est pas ce qui s'est passé. La thésaurisation par les Banques centrales française et américaine a créé une pénurie artificielle de monnaie, et les prix ont baissé mécaniquement : plus de 30 % entre 1928 et 1932. D'où une explosion du chômage (il est plus facile de licencier que de baisser les salaires) et une chute des investissements. Pour sortir de la dépression, les pays quittent l'étalon or, ce qui leur permet de créer de la monnaie, en Grande-Bretagne dès 1931, la France la dernière en 1937, non sans conséquences dramatiques : entre 1930 et 1935, le revenu disponible baisse de 12 %.

Cette brève histoire de la Grande Dépression n'a bien entendu aucun rapport avec la crise actuelle, et seuls des esprits malveillants pourraient rapprocher l'étalon or et la défense de l'euro.

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La nature risque-t-elle de devenir silencieuse ?

Dans certains écosystèmes, notamment en Grande-Bretagne, les insectes se raréfient.

Valérie HANSIGAUD

Les populations d'animaux invertébrés, notamment des insectes, décroissent-elles ? Oui, du moins en Grande-Bretagne, si l'on en croit le livre publié en 2010 par des naturalistes britanniques, *Silent Summer* (L'été silencieux). Ce titre fait référence à celui de l'ouvrage de la biologiste américaine Rachel Carson qui, en 1962, dénonçait déjà les méfaits des pesticides.

On a longuement parlé de la déclin des populations d'insectes, mais ils étaient moins vulnérables aux changements

de l'environnement que les plantes ou les vertébrés. Or durant les années 1970, les premiers signes de cette régression sont apparus, y compris dans des réserves naturelles. Si que les guêpes, araignées ou limaces ne suscitent pas autant d'attention que d'autres animaux, ces organismes sont essentiels au monde vivant et ont un impact direct sur les mammifères et les oiseaux qui s'en nourrissent.

Comment a-t-on mesuré l'ampleur de la régression ? Avant tout, grâce à un patient travail de récolte de données durant

plusieurs décennies, associant de nombreux bénévoles. Ainsi, depuis 1968, un suivi régulier montre une régression de 44 pour cent des populations de papillons de nuit dans la moitié Sud de la Grande-Bretagne, et une relative stagnation dans la partie Nord.

Les populations de papillons de jour sont évaluées depuis 1976 : 170 000 observations hebdomadaires sur 1 500 sites différents ont permis de dénombrer plus de 12,5 millions de lépidoptères. Le constat est sans appel : les populations de 70 pour cent des espèces de papillons de jour ont

diminué, un déclin plus important que celui des oiseaux ou des plantes. Un chiffre illustre bien la régression des insectes : il faut trois minutes pour capturer une centaine de larves d'éphémères, insectes des rivières, sur un site du Surrey ; en 1979, l'opération prenait à peine dix secondes !

Cependant, la situation est complexe. Si des espèces régressent, d'autres profitent des changements de l'environnement et étendent leurs aires de répartition ; c'est

environnementaux ? Ou faut-il y voir les lacunes de nos connaissances concernant les autres insectes ? En effet, la plupart des espèces de papillons de jour britanniques étaient déjà inventoriées en 1900, contre 40 pour cent des cloportes et 70 pour cent des mouches de la famille des syrphes.

Le volume-Uni présente une autre particularité : c'est le pays où s'est manifesté le plus tôt et le plus massivement l'intérêt pour l'étude et la protection de la nature.

L'environnement s'y est progressivement dégradé, ce qui remet en question l'efficacité des mesures qui ont été prises. Dès lors, on s'interroge : si un pays développé n'arrive pas à juguler le déclin de sa flore et de sa faune,

comment pourrait-il promouvoir la protection de l'environnement à l'étranger, notamment auprès des pays en développement ? Pourtant, certaines mesures de protection ou de restauration de l'environnement donnent de bons résultats : la Tamise, un fleuve déclaré biologiquement mort dans les années 1950, contient aujourd'hui de nombreuses espèces, certaines très sensibles, tel l'hippocampe à museau court. On attribue ce résultat à l'efficacité du traitement des eaux usées, mais aussi au déclin de l'industrie britannique.

Ce résultat est encourageant, mais indique-t-il que la faune et la flore vont cesser de diminuer Outre-Manche ? Rien n'est moins sûr, notamment parce que les anciennes perturbations des écosystèmes n'ont pas toutes été éliminées, et que de nouvelles surviennent. Avec la population britannique croissant de dix millions d'habitants d'ici 2050, entraînant notamment la transformation de zones rurales en zones d'habitations.

Aujourd'hui, les jeunes Européens s'impliquent peu dans les Sociétés de naturalistes qui surveillent la santé de la nature. L'été 2050 sera peut-être silencieux, mais y aura-t-il encore des observateurs compétents pour le constater ?

Aujourd'hui, les jeunes Européens s'impliquent peu dans les Sociétés de naturalistes qui surveillent la santé de la nature. L'été 2050 sera peut-être silencieux, mais y aura-t-il encore des observateurs compétents pour le constater ?

Valérie HANISGAUD est historienne

des sciences de l'environnement.

N. Maclean (éd.), *Silent Summer: The State of Wildlife in Britain and Ireland*, Cambridge University Press, 768 p., 2010.

L'ÉTÉ 2050 SERA PEUT-ÊTRE SILENCIEUX, mais y aura-t-il encore des observateurs compétents pour le constater ?

le cas d'un tiers des espèces de papillons de jour. Ainsi, de nouvelles espèces bénéficient du réchauffement climatique. Ces nouvelles venues compenseront-elles la régression d'autres espèces dans les écosystèmes ? En fait, elles risquent plus vraisemblablement de contribuer à fragiliser l'ensemble des communautés animales, parce qu'elles peuvent devenir des espèces invasives et pullulantes.

La situation britannique est-elle transposable à d'autres pays européens ? La Grande-Bretagne et l'Irlande sont des territoires restreints à faible biodiversité précisément suivis par de nombreux naturalistes. Pourtant, quand on compare les données britanniques avec celles de l'Europe de l'Ouest, on constate que la situation est similaire en matière de dégradation des habitats ou d'adaptation des organismes vivants. Ainsi, de nombreux oiseaux souffrent du déclin de la polyculture, résultant de la politique agricole commune de l'Europe. Les populations de migrateurs (martinets, couffins, rossignols, etc.) diminuent tant en Europe continentale qu'en Grande-Bretagne, comme le montrent les inventaires réalisés dans les Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) et par le réseau Natura 2000.

Les données britanniques soulèvent diverses questions. Pourquoi les papillons de jour sont-ils les principales espèces d'insectes touchées ? Sont-ils plus sensibles que d'autres insectes aux changements

IRD Éditions Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

Sociétés, environnements, santé
N. VERNAZZA-LICHT, M.-E. GRUENAS, D. BLEY
364 p. 35 €

L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie
Y. LE BARS, E. FAUGÈRE, P. MENANTEAU, B. MUTTON, A. RIEDACKER, S. VELUT
472 p. 15 €

La dengue dans les départements français d'Amérique
R. COMBES, B. PHILIPON, A. YEBANZA
208 p. 15 €

Le Rift est-africain
B. HIRSH, B. ROUSSEL
424 p. 45 €

En vente dans toutes les librairies et par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr

www.ird.fr

VRAI OU FAUX

Voit-on des taches sombres en cas de glaucome ?

Oui, mais uniquement à un stade avancé de la maladie.

Le dépistage et le traitement permettent d'éviter cette perte de vision.

Laurent LALOUM

Le glaucome est une maladie de l'œil : plus précisément le nerf optique dégénère. Cela entraîne une perte progressive irréversible de la vision qui se caractérise par l'apparition de zones où l'on ne voit plus. Mais avant d'en arriver là, il est possible de traiter la maladie.

Dans le monde, plus de 66 millions de personnes sont traitées pour un glaucome et plus de 6 millions des cécités sont dues à cette maladie. En France, 800 000 personnes ont un glaucome traité, mais on estime qu'autant de glaucomateux ne sont pas connus.

Les cellules réceptrices de la lumière – ou photorécepteurs – dans la rétine sont reliées au cerveau par des fibres. Ces dernières, à la sortie de la rétine, sont réunies en un seul gros « câble », le nerf optique. L'œil est une coque souple gonflée par du liquide. Lorsque la pression régnant dans le globe oculaire est trop élevée (on parle d'hypertension oculaire, ce qui n'est pas lié à l'hypertension artérielle), les fibres du nerf optique dégénèrent petit à petit, et les pho-

torécepteurs auxquels elles sont connectées ne transmettent plus d'information au cerveau. Des troubles de la vision apparaissent.

Un glaucome commence par des zones dites aveugles dans le champ de vision : ce sont des régions de la rétine qui ne transmettent plus d'information au cerveau, car les fibres correspondantes du nerf optique sont mortes. Mais ces zones ne sont pas « reconstruites » comme aveugles : le malade ne se rend donc pas compte qu'il ne voit plus en certains endroits de son champ de vision. En effet, le cerveau est capable de reconstruire une image même si l'œil ne perçoit plus rien.

À mesure que la maladie progresse, les zones aveugles se multiplient. Elles ne sont détectables que si on les cherche systématiquement, avec des examens ophtalmologiques complexes, car, au début, ces régions sont seulement moins sensibles que la rétine normale.

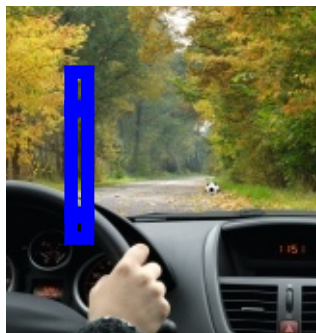
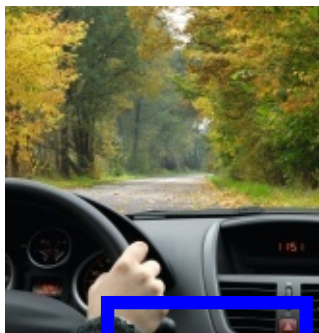
Le glaucome est une pathologie insidieuse : le malade n'en prend conscience qu'à un stade avancé de la maladie, lorsque

les zones aveugles sont si étendues que la perception devient mauvaise. Et même à ce stade, le malade peut avoir une acuité visuelle de dix dixièmes, alors qu'il ne peut plus conduire parce qu'il ne voit plus sur les côtés : les piétons ou des véhicules semblent surgir de nulle part !

Dépistage nécessaire

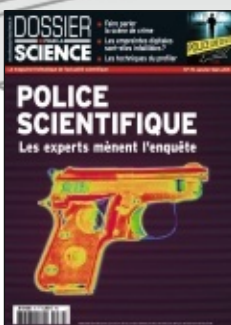
Pourtant, le glaucome se soigne bien quand il est dépisté tôt ; le traitement consiste à diminuer la pression dans le globe oculaire, et souvent une goutte dans les yeux tous les soirs suffit. C'est pour cela que l'ophtalmologue recherche systématiquement un glaucome et, en cas de doute, prescrit des examens complémentaires. Le glaucome est donc une maladie à prendre au sérieux, car sans traitement adapté, il évolue et peut engendrer une cécité.

Laurent LALOUM est neuro-ophtalmologiste à Paris.



Le glaucomateux voit l'image de gauche quand il conduit, alors qu'un ballon est présent au bord de la route (au milieu), des taches aveugles apparaissent dans son champ de vision. Elles s'étendront puis deviendront des taches sombres lorsque le sujet, s'il n'est pas traité, aura perdu 90 pour cent des fibres visuelles de la région correspondante (à droite).

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Balistique, génétique, psychologie, informatique, statistiques... Les sciences aident à reconstituer le déroulement des faits et à décider de la culpabilité ou de l'innocence d'un prévenu. Cependant, pour être fiables, les experts doivent laisser une place au doute et favoriser la confrontation d'hypothèses contradictoires. Dans ce numéro, découvrez tous les outils scientifiques à la disposition de ces experts, ceux de la réalité, non ceux des séries télévisées !

Les illusionnistes connaissent bien les rouages du cerveau ou plutôt ses failles, et en jouent : en focalisant le « projecteur attentionnel » sur un objet sans intérêt, ils agissent dans l'ombre en toute quiétude. Même si nous le savons, nous continuons à nous laisser prendre ! En plus, dans ce numéro, découvrez comment les foules réagissent - de façon plus intelligente qu'on ne le pense généralement -, ou encore le rôle des hormones sur les comportements.



Disponible aussi
en format pocket



Les virtuoses jouent avec leurs doigts, leurs mains, leurs bras, leur corps et... leur cerveau. Ce dernier contrôle le système moteur, l'audition, la mémoire, les émotions, tous ces ingrédients étant indispensables pour créer le frisson que connaissent les mélomanes. Mais la musique n'est pas réservée aux musiciens. Découvrez comment elle stimule la mémoire et la coordination motrice, ou encore l'apprentissage de la lecture chez l'enfant !

Disponible aussi
en format pocket

POUR LA
SCIENCE

Découvrez les sommaires de ces numéros
sur notre site
www.pourlascience.fr

QUESTIONS OUVERTES

Vers la privatisation des vols spatiaux ?

La NASA envisage de sous-traiter les vols habités à des entreprises privées. Au-delà des questions techniques et de sécurité que poserait une telle décision, cela pourrait paradoxalement conduire à les développer.

David FREEDMAN

Il y a deux ans, feu l'acteur de la série télévisée *Star Trek* James Doohan (« Scotty ») a eu droit à une dernière aventure, offerte par l'entreprise privée californienne *Space X*, créée en 2002 avec l'objectif d'envoyer des hommes en orbite autour de la Terre. En août 2008, *Space X* a embarqué les cendres de Doohan sur le troisième vol test de *Falcon 1*, une fusée à kérosène et oxygène liquide. Mais après deux minutes de vol, le dernier voyage de Doohan s'est terminé en catastrophe : le premier étage de la fusée est entré en collision avec le deuxième au moment de la séparation. C'était le troisième échec de *Space X* en... trois tentatives.

« Qu'espérez-vous d'autre ? », raillèrent d'anciens membres d'équipage de la NASA, des responsables de l'aérospatiale et de nombreux autres spécialistes convaincus que l'envoi en orbite de vaisseaux spatiaux, surtout s'ils sont habités, nécessite des armées d'ingénieurs, de techniciens et de directeurs, avec un financement de milliards d'euros et des plans de développement sur plusieurs décennies.

L'espace, après tout, est difficile d'accès. Une initiative privée peut parvenir à envoyer un prototype modeste à 100 kilomètres d'altitude, comme l'a réussi l'avion *SpaceShip One* de Burt Rutan en 2004. Mais c'était un exploit de salon comparé aux missions de la navette spatiale américaine ou la Station spatiale internationale (ISS). Pour gagner l'orbite terrestre, une altitude de 100 kilomètres est à peine le début d'une brève d'entrée sur une autoroute,

au bout de laquelle vous avez intérêt à accélérer franchement pour dépasser les 7,7 kilomètres par seconde nécessaires pour placer une charge en orbite stable à 300 kilomètres d'altitude.

Mais alors, pourquoi l'administration Obama a-t-elle annoncé en février 2010 que la NASA devrait pour ainsi dire se retirer du domaine des vols habités et l'abandonner au secteur privé ? Selon ce plan, la NASA devrait annuler l'essentiel des sept milliards d'euros affectés à ce jour au programme *Constellation*, destiné à remplacer la navette spatiale et à acheminer des astronautes vers la Station spatiale internationale et, à terme, jusqu'à la Lune. Au lieu de cela, l'agence fournira les capitaux de lancement à des jeunes sociétés telles que *Space X*, puis leur achètera des places sur leurs lanceurs.

Un pari risqué

De nombreuses voix se sont élevées pour dénoncer le « projet naïf et imprudent ». Parmi les plus virulents, l'icône de l'histoire spatiale Neil Armstrong, plus que sceptique à l'idée que le secteur privé prenne la relève de la NASA. Selon lui, il faudra de nombreuses années et des investissements considérables pour atteindre le niveau de sécurité et de stabilité requis. Comme d'autres, il pense que laisser le transport orbital aux mains d'entreprises privées serait dans le meilleur des cas un pas en arrière pour l'exploration spatiale habitée. Pire, le manque de compétence pourrait se tra-

duire d'une façon catastrophique par des accidents mortels. L'aventure de l'homme dans l'espace subirait alors un coup d'arrêt durable : en effet, une fois la massive infrastructure des vols habités de la NASA démantelée, il serait tellement long et coûteux de la reconstruire en cas d'échec des compagnies privées que personne ne le ferait. Après un été de débats houleux, le Congrès américain a cependant fini par adopter le plan à bon cœur.

Mais le fait que ce soit un pari risqué ne signifie pas que ce soit un mauvais pari. Il y a des raisons de croire que les compagnies privées pourraient être à la hauteur de la tâche et envoyer des hommes en orbite, assez vite, pour moins cher et de façon aussi fiable que la NASA. Et cela pourrait redonner vie à un rêve que 30 ans d'attentisme en matière d'exploration spatiale avaient estompé : celui d'une station en orbite. Ce « pied-à-terre » ne serait pas réservé aux seuls astronautes, mais ouvert à des légions de scientifiques, d'ingénieurs, et même à ceux qui n'ont de passer quelques jours dans l'espace. Mieux encore, cette vague de visiteurs spatiaux pourrait lancer une nouvelle économie orbitale, dont certains pensent qu'elle serait autosuffisante.

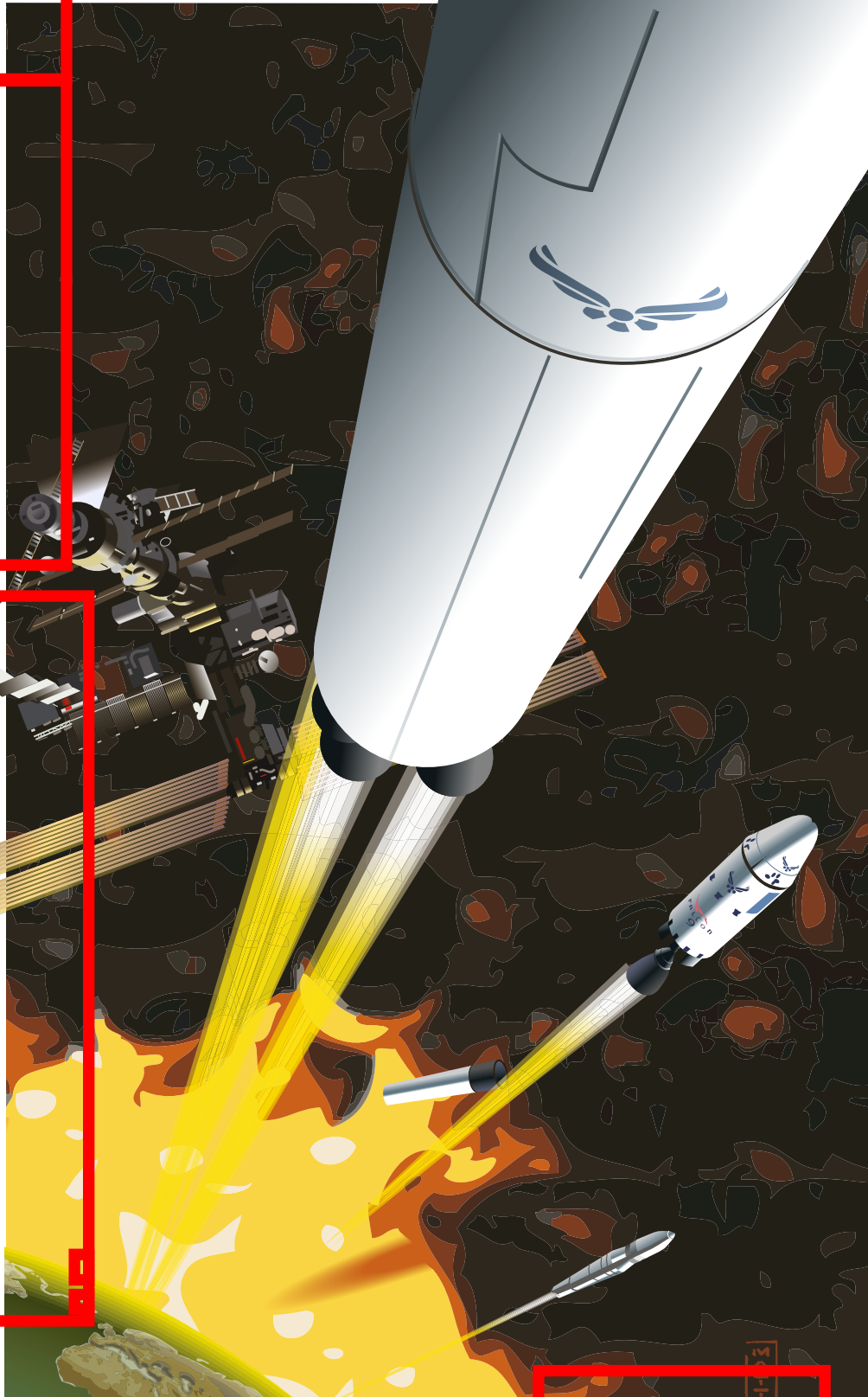
S'engager dans le secteur commercial pour construire des lanceurs et des vaisseaux spatiaux n'est pas nouveau. Les véhicules qui ont transporté les astronautes de la NASA dans l'espace ont toujours été construits par des entreprises privées. Ce qui changera avec le plan d'Obama, c'est la façon dont la NASA travaillera avec les autres

prises privées. L'Agence spatiale américaine a toujours engagé ses fournisseurs sur des contrats de type « prix de revient plus marge » (*cost-plus*), ce qui signifie que la NASA leur rembourse ce qu'ils dépensent et y ajoute un profit garanti.

Les experts s'accordent à dire que de tels contrats augmentent les prix et la complexité des projets, car plus le nombre de fonctionnalités et de mesures de sécurité augmente, plus les fournisseurs gagnent d'argent. Plus l'Agence spatiale limite le risque de se voir un jour accusée d'avoir mis en danger des vies par souci d'économies. Ce serait la raison pour laquelle, selon certains, les vols habités sont confinés en orbite terrestre basse depuis près de 30 ans, avec des vols de la navette spatiale à plus de 750 millions d'euros par mission. À ce prix, les vols sont rares et le bilan de la navette spatiale pas aussi étoffé qu'espéré. Les critiques mettent en garde contre le même gaspillage avec le programme *Constellation*.

Le juste prix

Un nouveau modèle où l'on « paie pour le produit » ne serait pas sans précédent, note Paul Guthrie, analyste du groupe d'expertise pour l'espace et la défense *Tauri*, à Alexandria, en Virginie. Depuis la Seconde Guerre mondiale, le gouvernement des États-Unis a investi massivement dans les sciences et la technologie, avec des retombées commerciales incertaines, mais potentiellement importantes. Ces investissements ont ouvert la voie aux industries biotechnologiques et informatiques, entre autres. Comme pour le vol spatial aujourd'hui, ces industries ont été confrontées à leurs débuts à des défis technologiques et commerciaux. Elles ont pu les surmonter grâce à des programmes gouvernementaux, fonctionnant comme le nouveau plan de la NASA : en donnant aux entreprises des crédits pour leur développement et en étant un « client garanti », tandis que l'industrie améliorerait ses produits et développerait des économies d'échelle. Le Département américain de la défense a été



le principal financier et le principal client de nombreux fabricants de circuits intégrés au début des années 1970, par exemple, jusqu'à ce que des circuits intégrés beaucoup plus performants et moins chers soient disponibles, à la suite de la vive concurrence à laquelle se sont livrées les entreprises.

Il n'existe sans doute pas d'équivalent de la loi de Moore (le nombre de transistors par unité de surface double tous les deux ans) pour les voyages spatiaux, mais il n'y a sûrement aucune loi qui les oblige à rester indéfiniment très chers. Les entreprises

le prix du programme par dix. Une place pour la Station spatiale passerait ainsi de 40 millions à 4 millions d'euros.

Pour encourager ce type d'innovations, la NASA devra changer sa façon de travailler. L'Agence a toujours dicté précisément à ses fournisseurs comment les véhicules spatiaux devaient être construits, ce qui est normal étant donné que c'est la seule à avoir les compétences nécessaires jusqu'à présent. Mais avec ce nouveau fonctionnement, elle devra se contenter d'imposer les objectifs.

D'après Phil McAlister, membre de l'équipe de la NASA en charge de l'analyse des programmes, l'agence ne sera pas trop exigeante sur la façon dont les fournisseurs devront répondre au cahier des charges. Il y aura une liste d'objectifs majeurs et un maximum de flexibilité sur la façon de les remplir. Ensuite, à des étapes spécifiques, la NASA vérifiera que les exigences ont été satisfaites.

Pour aider les entreprises à concevoir des véhicules aussi simples et efficaces que possible, le nouveau plan élimine du programme *Constellation* les missions de la navette orbitale vers la Lune. La mission se concentrerait de déposer cargaisons et équipes en toute sécurité et à moindre coût jusqu'à la Station spatiale internationale, et de les en ramener.

La suppression des missions lunaires a attiré de nombreuses critiques, mais c'est oublier qu'elles n'étaient qu'un entraînement pour une véritable objectif à long terme : le voyage vers Mars. Et contrairement à ce que certains opposants au nouveau plan ont laissé entendre, il n'est pas question que la NASA dépense moins d'argent pour l'espace ou abandonne les vols habités à long terme. Le plan reconnaît seulement de façon implicite qu'un aller-retour vers Mars nécessitera des progrès technologiques bien plus importants que ne le permettait le programme *Constellation*. Et en libérant la NASA de l'obligation de consacrer tout son budget à ce programme, ce plan donne à l'Agence le répit nécessaire pour mettre en route d'autres projets.

Selon Eligar Sadeh, président d'*Astroconsulting International*, un cabinet

SI LES COÛTS BAISSENT DE FAÇON NOTABLE

et que la sécurité était assurée, les vols spatiaux pour particuliers pourraient se multiplier.

en concurrence dans le cadre du plan Obama seront forcées de réduire leurs coûts : si elles dépassent le budget alloué, la différence sera à leur frais ; si elles dépensent moins, elles feront des bénéfices. Outre la question des financements, celle de la sécurité à respecter malgré la réduction des coûts est bien évidemment cruciale.

Plus d'autonomie pour des coûts réduits

Space X, qui s'impose pour l'instant comme chef de file de la nouvelle industrie spatiale, a déjà beaucoup travaillé dans ce sens. Elle a réduit le prix des boulons en aluminium anodisé en les usinant elle-même. Elle a diminué notablement le coût du matériau à base de carbone utilisé dans les boucliers thermiques en mettant au point sa propre formulation (certes inspirée d'un brevet de la NASA). Elle a remplacé les tubes très onéreux destinés à éliminer la turbulence dans les tuyères de la navette spatiale par un système meilleur marché fondé sur des tubes en spirale de diamètre constant.

Selon Kenneth Bowersox, ancien commandant de la navette spatiale et aujourd'hui vice-président de Space X, le rapport du coût et de la performance changera forcément : les charges placées en orbite seront certes plus petites, mais l'objectif sera de diviser

CONTRAINTES ORBITALES

Le vol spatial orbital implique pas seulement de monter suffisamment haut ; il faut aussi voyager suffisamment vite pour ne pas retomber sur terre. C'est pourquoi un vol balistique, où l'on se contente de monter, puis de redescendre comme

la fusée *SpaceShipOne* en 2004, ne prouve pas que les compagnies privées aient conquis l'espace : placer un module avec équipage en orbite terrestre basse est bien plus difficile. Un voyage jusqu'à la Lune le serait plus encore.

Énergie requise

L'énergie totale nécessaire pour lancer chaque engin indiqué sur ce schéma est la somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique. Les paramètres complexes comme la résistance de l'atmosphère ont été négligés. Il s'agit donc seulement d'approximations.

■ Satellite géostationnaire

Hauteur : 35 800 kilomètres (km)
Masse : 6 080 kilogrammes (kg)
Vitesse : 3 074 mètres par seconde (m/s)
Énergie : 56,5 Mégajoules par kilogramme (MJ/kg)

■ Apollo 11

(position à la fin de la combustion finale)
Hauteur : 1 920 km
Masse : 40 000 kg
Vitesse : 10 844 m/s
Énergie : 73,3 MJ/kg

■ Falcon 9

Hauteur : 350 km
Masse : 10 000 kg
Vitesse : 7 407 m/s
Énergie : 30,7 MJ/kg

■ Boeing 777

Hauteur : 12 km
Masse : 160 000 kg
Vitesse : 248 m/s
Énergie : 0,2 MJ/kg

■ SpaceShipOne

Hauteur : 100 km
Masse : 2 000 kg
Vitesse : 0 m/s
Énergie : 1,0 MJ/kg

Télescope
spatial Hubble
610 km

Navette spatiale
185-643 km

Station spatiale
internationale (ISS)
400 km

Orbite géostationnaire
et au-delà :
plus de 35 000 km

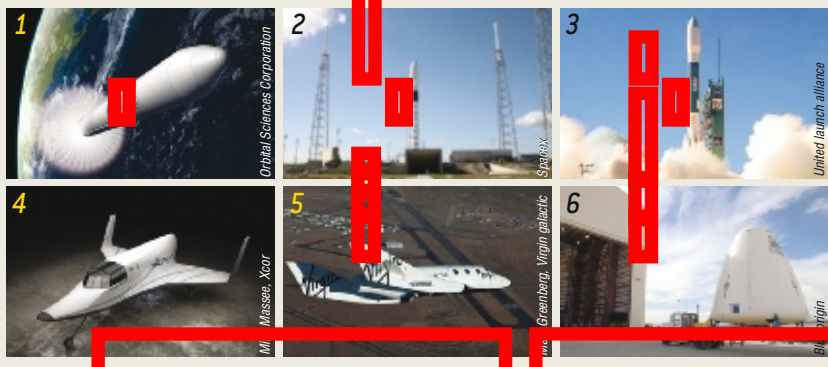
Orbite terrestre moyenne :
2 000 à 35 000 km

Orbite terrestre basse :
180 à 2 000 km

■ Suborbital
■ Orbite terrestre
■ Vers l'orbite lunaire

LES VAISSEAUX DE DEMAIN

Plus d'une dizaine de compagnies ont annoncé leur intention d'envoyer des hommes en vol suborbital ou en orbite basse. Les astronautes atteindront l'orbite basse en décollant avec le *Taurus 1* (1) construit par *Orbital Science Corporation*, dans le *Falcon 1* de *Space X* (2), qui a été lancé avec succès durant l'été 2010, ou sur une variante de la fusée *Delta* (3) construite par *United Launch Alliance*, une coentreprise entre *Boeing* et *Lockheed Martin*. Les touristes, quant à eux, iront faire des tours à la frontière de l'atmosphère à bord de véhicules construits par *Xcor* (4), *Virgin Galactic* (5) ou *Blue Origin* (6).



d'experts pour l'espace et la défense de Colorado Springs, le nouveau plan entraînera une réduction des coûts et une meilleure gestion du dossier « orbite terrestre basse » de la NASA, si bien que celle-ci pourra se recentrer sur les sciences de la Terre et de l'espace.

En fait, le plan Obama prévoit une hausse du budget de la NASA dans les années à venir. En un sens, le président des États-Unis tente de redonner à la NASA l'image qu'elle avait dans les années 1960 en faisant d'elle à nouveau une agence de recherche et de développement performante, et en déléguant à des fournisseurs civils l'orbite terrestre basse. Mars deviendrait la nouvelle Lune.

Le nouveau plan ne serait cependant pas très pertinent si, en fin de compte, les entreprises ne parvenaient pas à développer un véhicule orbital sûr et fiable, que le programme *Constellation* pourrait mettre au point (mais pour plus cher). Le secteur privé parviendra-t-il ? Bien qu'il soit encore trop tôt pour l'affirmer, ce n'est pas impossible. En septembre 2008, juste un mois après le lancement raté embarquant les restes de James Doohan, le *Falcon 1* de *Space X* est devenu la première fusée privée à ergol (hydrogène et oxygène liquides) à être placée en orbite. Elle a été

suivie moins d'un an après par *Falcon 9*, une fusée plus puissante conçue pour transporter un véhicule avec équipage.

Les essais réussis de *Space X* sont encourageants, mais ils représentent les seuls succès tangibles. Le seul autre nouvel acteur qui se prépare à produire un véhicule spatial, *Orbital Sciences* à Dulles, en Virginie, n'a pas encore grand-chose à présenter. Les deux entreprises ont embauché certains des directeurs et ingénieurs les plus compétents de l'industrie spatiale, mais il est impossible de savoir si l'une ou l'autre sera capable de produire un véhicule de qualité avec des budgets réduits et sans que les ingénieurs de la NASA ne leur fournissent en aval des cahiers des charges très détaillés.

Vers une réduction des coûts

D'après John Logsdon, ancien directeur de l'Institut de politique spatiale à l'Université George Washington, si l'on donne une chance à ces entreprises privées, elles y parviendront sans doute. Les véhicules résultants coûteront moins cher que dans le cadre du programme *Constellation*, même

s'ils ne seront pas forcément plus fiables ou efficaces, du moins dans les cinq à dix prochaines années. Pour J. Logsdon, on va d'abord assister à une réduction des coûts. Parmi les entreprises spatiales qui s'apprêtent à répondre aux appels d'offres de la NASA citons *Blue Origin*, créée par le fondateur d'Amazon, Jeff Bezos, *Armadillo Aerospace* par le magnat des logiciels John Carmack, et *Xcor Aerospace*, par des vétérans de l'industrie aérospatiale.

L'industrie spatiale ne se limitera pas aux fabricants de navettes orbitales. Supposons que les coûts baissent notablement et que la sécurité soit suffisante ; les voyages spatiaux pour particuliers pourraient alors se multiplier. La Station spatiale internationale ne pourra pas accueillir tous ces touristes de l'espace. L'entreprise *Bigelow Aerospace* a développé des capsules gonflables dont les composants modulaires peuvent être assemblés et déployés dans l'espace pour former des quartiers d'habitation orbitaux. Il est vraisemblable que d'autres entreprises vont émerger pour proposer des lieux de vie, des laboratoires, des installations de stockage et de construction dans l'espace. Et la compétition sera encore accrue quand les pays du monde entier se lanceront dans cette nouvelle course à l'espace. Le Japon et l'Inde entrent déjà dans la bataille.

Les fournisseurs de l'aérospatiale entreront sans doute eux aussi dans la compétition. Ces grandes entreprises savent construire des véhicules spatiaux opérationnels ; la seule question est de savoir si elles pourront les construire en réduisant leurs coûts. ULA (*United Launch Alliance*), une coentreprise de *Boeing* et *Lockheed Martin*, envoie déjà des charges en orbite pour 75 millions d'euros. Bien que ce soit quatre fois ce que *Space X* projette de faire payer, ULA a acquis une réputation de fiabilité.

Le plus grand intérêt financier potentiel du plan Obama serait de baisser suffisamment les coûts d'un lancement en orbite pour créer un cercle vertueux : si les prix baissent, davantage de personnes iraient dans l'espace, ce qui entraînerait des économies d'échelle et une intensification de la concurrence, laquelle ferait encore

La sélection SCIENCE

Spécial évolution

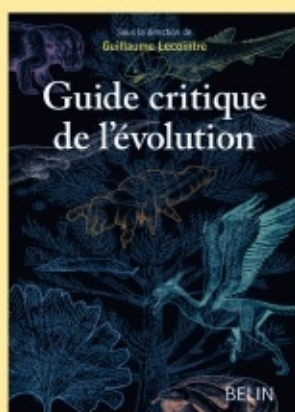


La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer,
illustré par Alain Bénétou

Ce livre répare une injustice ! Il braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des vertébrés à quatre pattes qui, bien avant le règne des dinosaures, peuplaient notre planète. Retrouvez-les dans cet ouvrage, avec plus de 100 reconstitutions d'animaux pour beaucoup inédites, ainsi que de nombreuses photos de fossiles. Un livre événement pour tous les passionnés des mondes perdus !

978-2-7011-4206-7 • 208 p. • 25,00 €

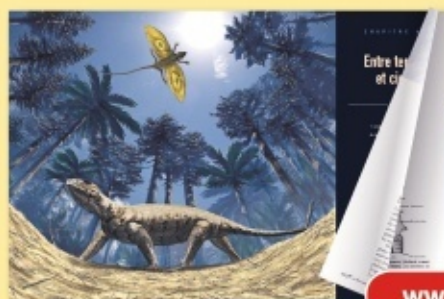


Guide critique de l'évolution

Sous la direction
de Guillaume Lecointre

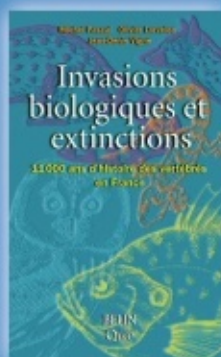
Pourquoi la théorie de l'évolution est-elle si souvent mal comprise du public ? Pourquoi fait-elle l'objet de si nombreuses attaques ? Ces questions sont au cœur de cet ouvrage. Il ne critique pas la théorie contemporaine de l'évolution, mais la façon dont nous en parlons. Il présente le cadre scientifique, épistémologique et historique dans lequel on peut comprendre l'évolution, et donne les clés pour déjouer les pièges que notre langage et nos réflexes premiers nous tendent.

978-2-7011-4797-0 • 576 p. • 35,00 €

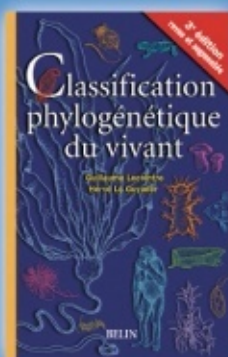


Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



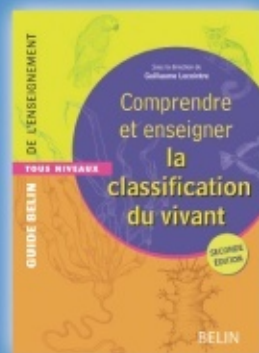
M. Pascal, O. Lordelec et J.-D. Vigne
978-2-7011-3628-8 • 352 p. • 35,50 €



G. Lecointre et H. Le Guyader
978-2-7011-4273-9 • 560 p. • 41,50 €



A. Meinesz
978-2-7011-4694-2 • 336 p. • 19,50 €



G. Lecointre
978-2-7011-4798-7 • 360 p. • 27,00 €



M. Gargaud, H. Martin, P. López-García,
T. Montmerle, R. Pascal
978-2-7011-4799-4 • 304 p. • 26,50 €

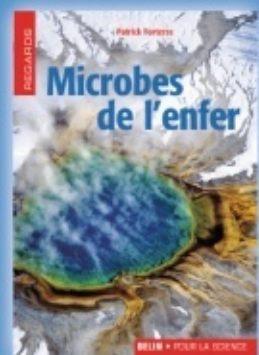


C. Bousquet
978-2-7011-5119-9 • 160 p. • 6,95 €

Prix littéraire de culture scientifique



P. Tassy
978-2-7011-4971-4 • 168 p. • 18,00 €



P. Forterre
978-2-7011-4425-2 • 256 p. • 20,50 €

L'AUTEUR



David Freedman est journaliste scientifique à New York.

BIBLIOGRAPHIE

Review of U.S. Human Spaceflight Plans Committee, *Final Report*, sous la direction de N. Augustine, octobre 2009. www.nasa.gov/offices/hsf/home

Michael Behe, *Rocketeers: How a Visionary Band of Business Leaders, Engineers, and Pilots Is Boldly Privatizing Space*, Smithsonian, 2007.

G. Musser, *Cinq priorités pour l'exploration du Système solaire*, Pour la Science n° 362 - décembre 2007. <http://bit.ly/pls362-musser>

C. Dingell, W. Johns et J. White, *Retour sur la Lune*, Pour la Science n° 362 - décembre 2007. <http://bit.ly/pls362-constellation>

baisser les prix, et ainsi de suite. Si un nombre suffisamment important de personnes visitent l'espace, il faudra créer de grandes infrastructures en orbite, ce qui attirerait encore davantage de personnes. Une économie spatiale pourrait ainsi se mettre en place, à condition encore une fois que la sécurité des vols soit assurée et que ces vols puissent être rentables.

Mais le simple fait de faire baisser le prix d'un voyage en orbite attirera-t-il davantage de clients ? Y aura-t-il assez de personnes intéressées pour rendre les navettes rentables et stimuler la concurrence ? Sans vision claire des bénéfices attendus au-delà des commandes de la NASA, l'avenir du secteur privé dans l'espace reste très incertain.

Certes il existe déjà un marché : celui occupé par la navette spatiale. Les États-Unis et les autres pays continueront à vouloir envoyer des scientifiques et des techniciens dans la Station spatiale internationale pour y mener des recherches en impesanteur, ou pour finaliser des observations de la Terre ou de l'espace. Si une nouvelle industrie spatiale pouvait abaisser le prix d'un « taxi orbital » aux alentours de quatre millions d'euros, davantage de pays envieront leurs chercheurs dans l'espace. Il n'en reste pas moins que ce prix sera encore trop élevé pour la plupart des organismes.

Les perspectives d'une économie orbitale s'amélioreraient s'il s'avérait avantageux de fabriquer certains objets en impesanteur. Pour l'instant, ce n'est pas le cas. La quasi-absence de gravité ressentie dans une navette permet par exemple de produire des cristaux exceptionnellement gros et purs ou des roulements à billes et autres objets sphériques parfaits. Quelle que soit la valeur ajoutée de ces produits, les coûts d'installation et d'exploitation d'une usine dans l'espace seraient des milliers de fois supérieurs. Selon Lon Levin, cofondateur de SkyServer Ventures, un fonds d'investissement dans les jeunes pousses du secteur spatial, même l'exploitation d'un astéroïde de diamant pur ne serait sans doute pas rentable.

La seule possibilité de découvrir un jour un produit pharmaceutique ou un nanomatériau ne pouvant être fabriqué qu'en

microgravité devrait ouvrir une nouvelle profession : chercheur en impesanteur. Le coût du transport en orbite a limité jusqu'à présent ce domaine d'expérimentation. Mais si ce coût diminuait, il y aurait de plus en plus d'expériences réalisées en orbite, et donc des chances de trouver un composé ou un résultat intéressant. Une seule découverte remarquable donnerait une forte impulsion à l'économie orbitale.

Le tourisme spatial, un marché crédible ?

Cependant, de nombreux observateurs pensent que le secteur le plus prometteur à court terme est celui du tourisme spatial. Depuis 2001, la Russie a envoyé huit touristes jusqu'à la station spatiale avec ses fusées Soyuz, à des prix compris entre 22 et 36 millions d'euros. Avec des billets nettement moins chers, le nombre de candidats au départ augmenterait. Selon L. Levin, il existe des clients potentiels pour se rendre dans la Station spatiale internationale, et ils seraient prêts à payer entre 10 et 20 millions de dollars pour y aller.

Mais une menace plane sur ce marché potentiel : celui d'un accident mortel. Si des clients étaient tués dans un accident de navette, ce serait la fin immédiate du tourisme spatial. C'est ce que pense Sherman McCorkle, DG de la firme d'expertise-conseil Technology Ventures à Albuquerque, au Nouveau-Mexique (État qui construit un « spatoport » à 225 millions de dollars, anticipant une industrie du vol spatial). Si un vol orbital touristique se soldait par un échec, il n'y en aurait certainement pas d'autres avant longtemps.

Le tourisme devrait être un moteur pour l'économie spatiale, mais son développement serait lent, et ce sera, du moins au début, un marché limité. Le tourisme pour milliardaires peut paraître un moteur à la fois fragile et superficiel comparé à nos rêves d'exploration spatiale, mais cela ne semble plus être du domaine de l'utopie. Le désir de repousser les limites de notre village global est un projet ambitieux, et le tourisme spatial pourrait être un outil efficace pour le faire avancer.

Découvrez le site internet de Pour la Science

En quelques clics, retrouvez :

- » Des actualités quotidiennes et d'autres contenus en accès libre
- » Tous les articles et numéros depuis 2004 en PDF
- » L'accès libre à tous les numéros compris dans votre abonnement
- » Tous les ouvrages Belin-Pour la Science
- » Votre compte abonné



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

L'arrivée des langues indo-européennes en Europe

Ruth Berger

La paléogénétique et la linguistique assistée par ordinateur livrent de nouveaux indices sur la diffusion des langues.

Avant que les langues indo-européennes ne conquièrent l'Europe, on y parlait notamment une langue apparentée au basque actuel, le vascon. Ainsi, en Europe occidentale et centrale, beaucoup de fleuves portent des noms dérivés de termes basques. Mais quand et comment les langues indo-européennes ont-elles supplanté celles de l'ancienne Europe? Comme nous le verrons dans cet article, des études récentes de génétique et de linguistique ont apporté de nouveaux éléments de réponse à cette question.

Longtemps a prévalu l'hypothèse de l'archéologue américano-lituanienne Marija Gimbutas (1921-1994), selon laquelle des peuples de cavaliers nomades originaires des steppes entourant la mer Noire et la mer Caspienne auraient commencé, il y a 6000 ans au plus, à se répandre par vagues successives en Europe et en Asie. Quelques indices archéologiques en témoignent, mais ils n'ont pas apporté de réponse claire. En tout cas, ces peuples des steppes et leur culture patriarcale guerrière semblaient concorder avec certains éléments que l'on croyait connaître depuis le XIX^e siècle sur les anciens Indo-Européens et leur « patrie d'origine ».

L'archéologue britannique Colin Renfrew a élaboré à la fin des années 1980 une

hypothèse concurrente, selon laquelle les Indo-Européens seraient originaires d'Anatolie. Ils seraient arrivés bien plus tôt, il y a plus de 8000 ans, et ces colons auraient apporté l'agriculture à une Europe sauvage et faiblement peuplée.

L'œuvre de C. Renfrew est attrayante, parce qu'elle est simple : avec l'introduction de l'agriculture, l'Europe a connu sa plus grande révolution préhistorique et il tombe alors sous le sens de ramener la propagation des langues indo-européennes au même événement. Cela suppose toutefois que l'agriculture ait effectivement été introduite en Europe par l'immigration. C'est précisément ce dont doutent beaucoup d'archéologues. Selon eux, la population européenne ancestrale s'est convertie elle-même à un mode de vie agricole, déterminée en quelque sorte par le contact avec l'Anatolie, mais sans échanges importants de populations.

La génétique peut-elle nous aider à aller plus loin? Depuis les années 1980, les

1. CES BASQUES SCULPTÉS de la ville de Myre, de l'ancienne Lycie (dans la région de l'actuelle Antalya, dans le sud de la Turquie), semblent parler. Le lycien, supplanté par le grec au I^{er} siècle avant notre ère, est l'une des plus anciennes langues indo-européennes.



© Shutterstock / gbliski

chercheurs tentent de déduire les anciens mouvements migratoires de l'étude des gènes d'individus vivant aujourd'hui. En Europe, ils ont trouvé une diminution progressive de la fréquence de certains variants de gènes du Sud-Est vers le Nord-Ouest. On a supposé que cela représentait effectivement une vague d'immigration, mais il était impossible de dire quand elle aurait eu lieu.

De telles déductions sont incertaines. Supposons que vous deviez déduire du paysage politique actuel quels étaient les groupes parlementaires composant le parlement en 1848. Il n'y a guère de chance que cela donne un résultat exact. Il en va de même pour les généalogies génétiques : il existe toujours plusieurs scénarios historiques aboutissant à la répartition actuelle, et de nombreux détails du passé resteront inconnus à jamais. Les progrès réalisés ces dernières années dans la lecture de l'ADN ancien représentent donc une aubaine.

Les hypothèses concurrentes relatives à la « révolution néolithique » en Europe, qu'il y ait eu immigration ou non, ne peu-

vent être testées directement que par des découvertes de fossiles.

Les chercheurs travaillant avec Barbara Bramanti, à l'Université de Mayence, ont isolé de l'ADN mitochondrial (voir l'encadré page 38) sur 26 squelettes des premiers agriculteurs de l'Est de l'Europe centrale (il existe deux types d'ADN, l'ADN du noyau cellulaire et l'ADN des mitochondries ; ce dernier est transmis par les mères). Les agriculteurs appartenaient à la civilisation initiale de la céramique rubanée (ou culture rubanée), qui annonçait il y a quelque 7500 ans l'époque agricole dans nos régions. L'équipe de B. Bramanti a par ailleurs prélevé des échantillons d'ADN sur des restes de chasseurs-cueilleurs ayant vécu à la même époque.

Quand l'ADN témoigne

Résultat : les segments d'ADN analysés différaient considérablement entre les chas-

seurs et les agriculteurs. Ils paraissent même génétiquement plus éloignés que les autochtones d'Australie le sont des

L'ESSENTIEL

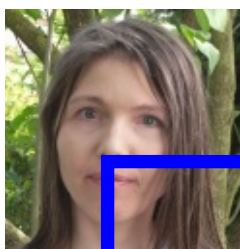
✓ L'origine des langues indo-européennes reste une question très débattue, mais qui est aujourd'hui éclairée par des analyses d'ADN et de arbres de parenté linguistique élaborés par ordinateur.

✓ Deux hypothèses s'affrontent. L'une affirme que ces langues ont gagné l'Europe via des migrations de peuples de guerriers nomades originaires des steppes entourant la mer Noire et la mer Caspienne, il y a moins de 6 000 ans.

✓ L'autre hypothèse invoque des migrations d'agriculteurs d'Anatolie, il y a plus de 8 000 ans.



L'AUTEUR



Ruth BERGER, biologiste et linguiste, a publié en 2008 un livre sur l'évolution des langues, *Warum der Mensch spricht* (Pourquoi l'homme parle).

Européen. Les premiers agriculteurs d'Europe centrale, appartenant à la civilisation de la céramique rubanée, étaient donc des immigrants. Cela concorde parfaitement avec la thèse de C. Renfrew, selon laquelle l'indo-européen serait arrivé en Europe par l'intermédiaire d'agriculteurs anatoliens.

Cependant, comme souvent, le diable se cache dans les détails. Certes, les chasseurs-cueilleurs ayant vécu à l'époque archaïque sur laquelle a porté l'étude de B. Bramanti, contrastaient fortement avec les agriculteurs de la culture rubanée ; leur réservoir de gènes appauvri est typique de petits groupes isolés. Mais les variants d'ADN mitochondrial trouvés chez les chasseurs de l'âge de pierre (les variants U4 et U5) existent encore en Europe, avec une fréquence de 11 pour cent pour U5. De nos jours, le variant U4, rare en Allemagne, se rencontre avec la fréquence la plus élevée en Europe de l'Est, ainsi qu'en

Tadjikistan et dans les régions voisines ; il était considéré jusqu'à présent comme typiquement indo-européen.

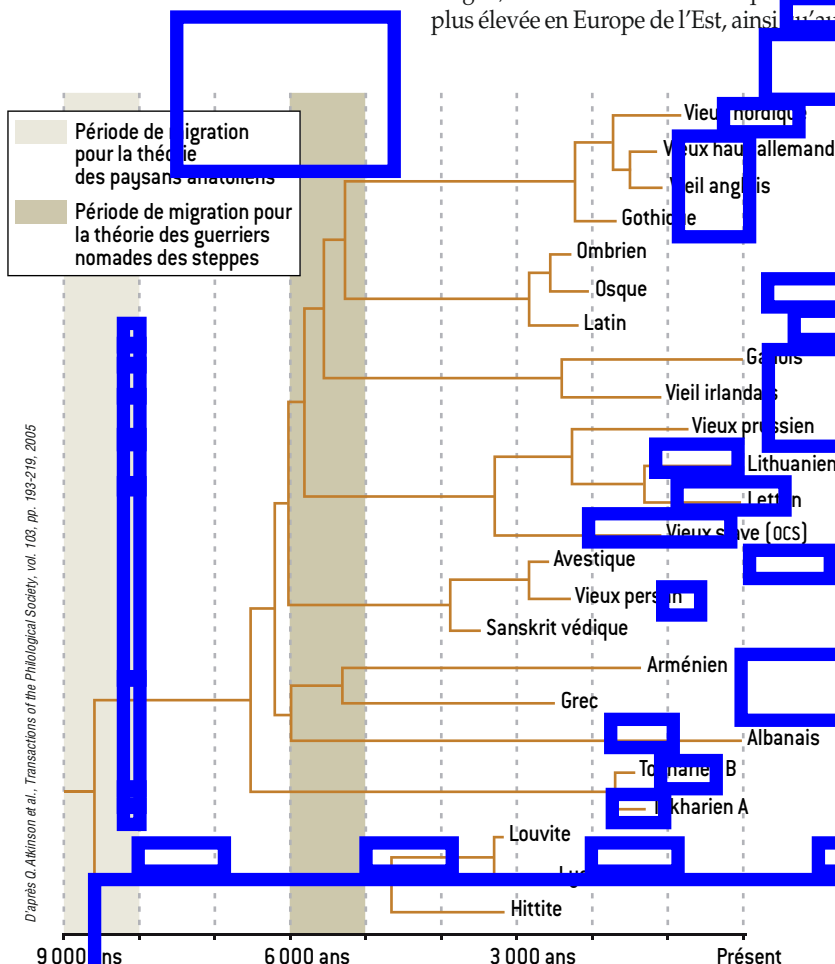
L'étude de B. Bramanti réservait une autre surprise : les agriculteurs de la culture rubanée présentaient une répartition des gènes différente de celle des Européens actuels. La plupart d'entre eux portaient le variant N1a ou H de l'ADN mitochondrial. Le variant H est jusqu'à présent très répandu chez les Européens et même dominant, alors que N1a n'existe presque plus en Europe.

Quelles migrations ?

Ce résultat inattendu pourrait indiquer au moins deux grands événements migratoires du Néolithique de l'Europe centrale. D'abord seraient arrivés les peuples de la culture rubanée, qui auraient repoussé des chasseurs-cueilleurs porteurs des variants U4 et U5. Ils auraient ensuite eux-mêmes été repoussés si fortement par une vague de migration ultérieure, que leur type mitochondrial caractéristique N1a aurait pratiquement disparu. Cela correspond davantage à l'hypothèse de Gimbutas de l'immigration de peuples des steppes au début de l'âge du bronze qu'à la thèse de C. Renfrew. Les peuples de la culture rubanée pourraient avoir été les Basques primitifs, ce ne serait que lors de la migration ultérieure que les Indo-Européens auraient atteint l'Europe. Mais ce pourrait être l'inverse... ou ni l'un ni l'autre : en réalité, le tableau est encore plus complexe.

D'une part, la modification de la répartition des différents types d'ADN pourrait résulter en partie de la sélection et non de la migration. Des variants mitochondriaux auraient ainsi subsisté ou été éliminés selon l'endroit, sans qu'il y ait déplacement d'individus.

D'autre part, la civilisation de la céramique rubanée n'a pas été la seule agriculture primitive en Europe. Dans le Sud, le long des côtes méditerranéennes, il en existait une seconde, moins développée, dont les membres vivaient en partie dans des grottes. La céramique à empreintes de coquillages, caractéristique de la culture dite cardiale (*Cardium* est un genre de coquillage), est attestée au plus tôt en Thessalie dans l'actuelle Grèce ; mais elle s'étend le long de la côte Nord et Sud de la Méditerranée jusqu'à l'Atlantique. On a distingué un précurseur possible au Liban, tandis que les origines des peuples de la civilisation de la céramique rubanée se situent



D'après Q. Atkinson et al., *Transactions of the Philological Society*, vol. 103, pp. 193-219, 2005

2. CET ARBRE GÉNÉALOGIQUE des anciennes langues indo-européennes a été établi à l'aide d'une simulation informatique. L'ordinateur a traité des listes de vocabulaire de base de chaque langue à l'aide d'un algorithme statistique. La fiabilité de cet arbre reste à déterminer, tant que l'on ne disposera pas d'éléments d'information obtenus par d'autres moyens. L'analyse a été réalisée avec un autre choix de langues que celui des pages 36 et 37 et a donné des valeurs similaires, mais non identiques (cf. supra Q. Atkinson et al., *Transactions of the Philological Society*, vol. 103, pp. 193-219, 2005.)

dans l'espace danubien occidental. La culture cardiale méditerranéenne, contrairement à celle de la céramique rubanée, est ainsi directement liée à l'Orient.

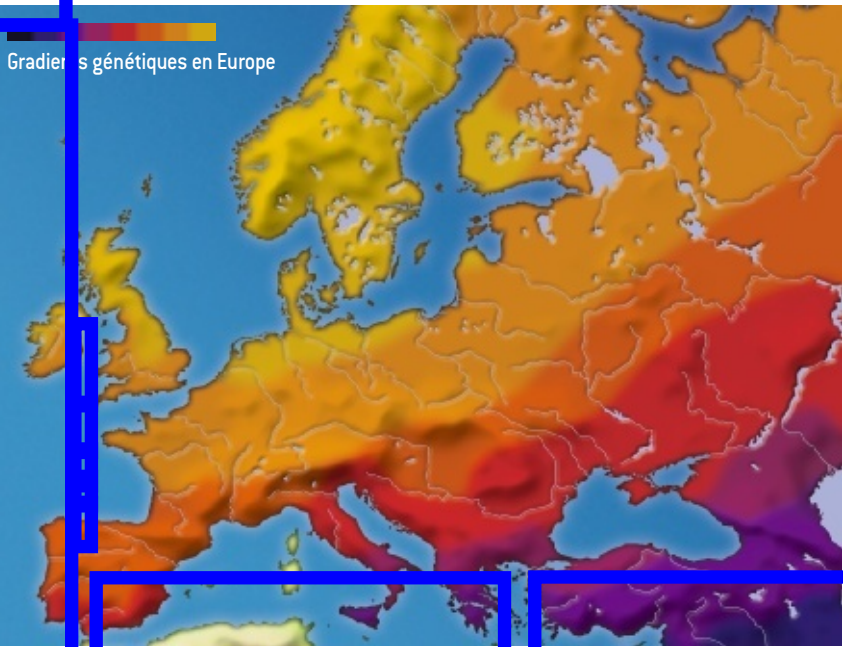
Les origines de certaines composantes du réservoir de gènes européens se trouvent-elles chez les représentants de la culture cardiale? Ces derniers, et non les peuples de la culture rubanée, seraient-ils les Indo-Européens recherchés? En 2005, Helen Chandler et ses collègues, de l'Université d'Oxford, ont mené une étude paléogénétique au Portugal. Là aussi, des chasseurs-cueilleurs locaux ont été comparés avec des agriculteurs du Néolithique et les chercheurs ont travaillé avec des marqueurs de l'ADN mitochondrial, le génome du noyau étant plus difficile à isoler et séquencer à partir d'os anciens.

Des différences sont aussi apparues entre les chasseurs et les agriculteurs portugais, mais elles se sont révélées beaucoup moins marquées que celles notées chez les sujets examinés par l'équipe de B. Bramanti. Avant tout, les deux groupes portugais divergent de manière similaire de la répartition moyenne européenne des différents types mitochondriaux: le variant J, considéré comme caractéristique du Proche-Orient, est totalement absent; en revanche, dans les deux groupes, les variants H et U sont respectivement très fortement et fortement représentés. La diversité est globalement réduite, comme on pouvait s'y attendre pour des populations vivant aux marges du continent à l'âge de pierre.

L'équipe de H. Chandler a comparé les anciens Portugais aux populations actuelles et en a conclu que les chasseurs tout comme les agriculteurs ressemblent, pour ce qui est de leur ADN mitochondrial, essentiellement aux Basques, aux Galiciens et aux Catalans. Du moins au Portugal, la première culture néolithique semble ainsi avoir été représentée par une population indigène vivant sur les côtes méditerranéennes occidentales. Dans cette région, on recherche sans doute les Indo-Européens en vain.

En résumé, la paléogénétique n'a pas apporté jusqu'ici d'éléments étayant la thèse de C. Renfrew, selon laquelle les premiers agriculteurs auraient immigré d'Anatolie. Concernant la civilisation de la céramique rubanée, il y a bien eu une migration, mais elle ne permet de remonter que jusqu'à l'espace danubien. De surcroît, comme la continuité génétique

Gradients génétiques en Europe



3. SUR CETTE CARTE, LES COULEURS indiquent la fréquence de divers variants génétiques dans les populations. Les variants les plus fréquents en orient se rarent à mesure que l'on va vers le Nord-Ouest (et inversement), ce qui est compatible avec une colonisation en une ou plusieurs vagues à partir du Sud-Est.

directement les peuples de la culture rubanée et les Européens actuels fait défaut, il est probable qu'il y ait eu des migrations ultérieures vers la région considérée.

Si la génétique ne répond pas pour le moment à la question de l'origine des Indo-Européens, la linguistique nous aiderait-elle? En 2003 parut une étude, très débattue depuis lors, qui commençait par l'assertion qu'il était possible de trancher entre les thèses de Gimbutas et de C. Renfrew.

Des mots pour un arbre

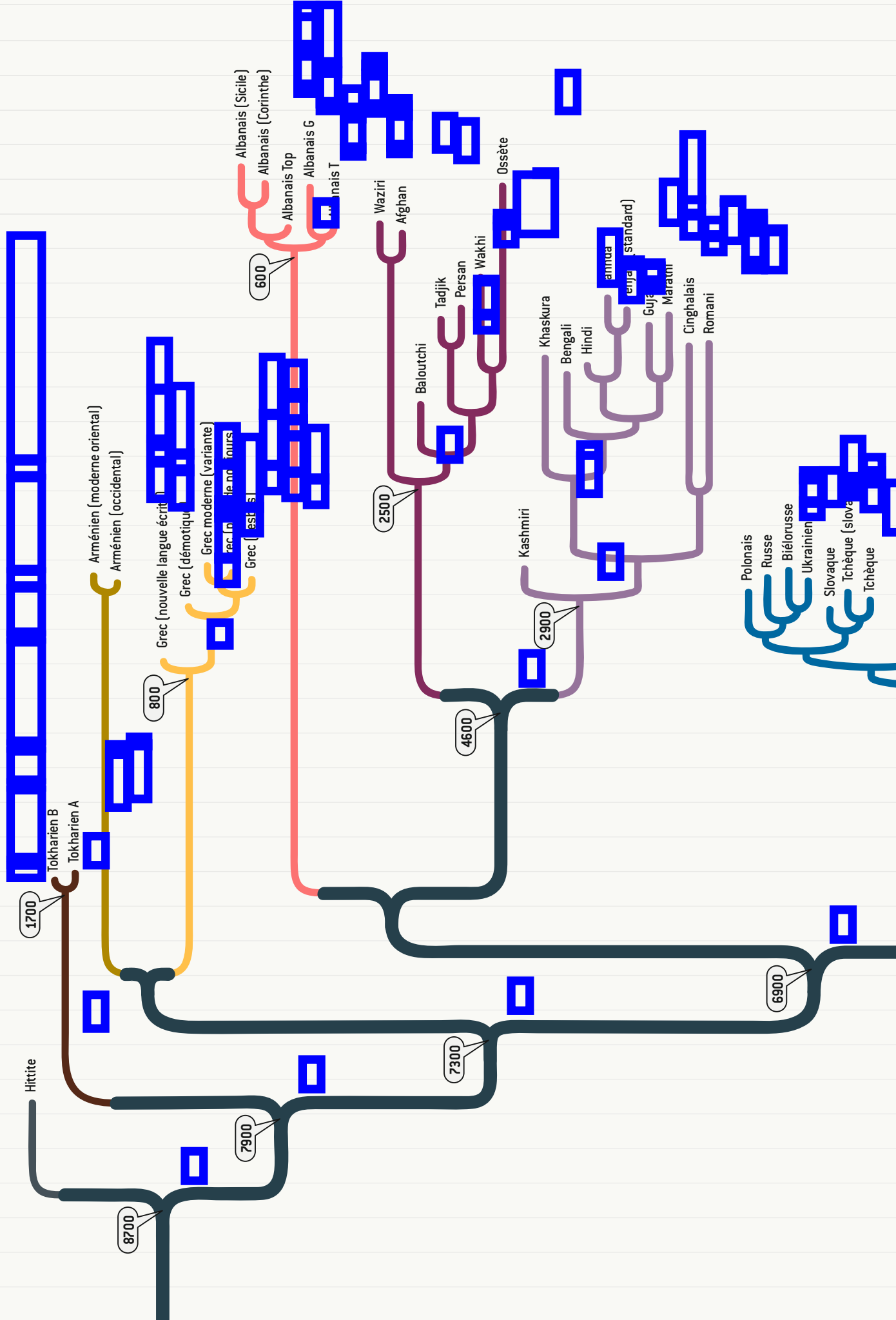
Quentin Atkinson et Russel Gray, deux psychologues de l'Université d'Auckland s'intéressant aux langues, déterminèrent à l'aide d'un programme informatique, qui sert normalement aux généticiens pour calculer les arbres généalogiques des humains, l'âge de la famille des langues indo-européennes. Ils ont fourni à l'ordinateur un vocabulaire de base de 200 mots et leurs équivalents dans les différentes langues indo-européennes, ainsi que des estimations sur le temps qu'il faut pour que dans une langue un mot soit remplacé par un autre d'origine différente. Le programme a alors calculé un arbre des langues et a déterminé l'âge de la racine et de l'ensemble des ramifications.

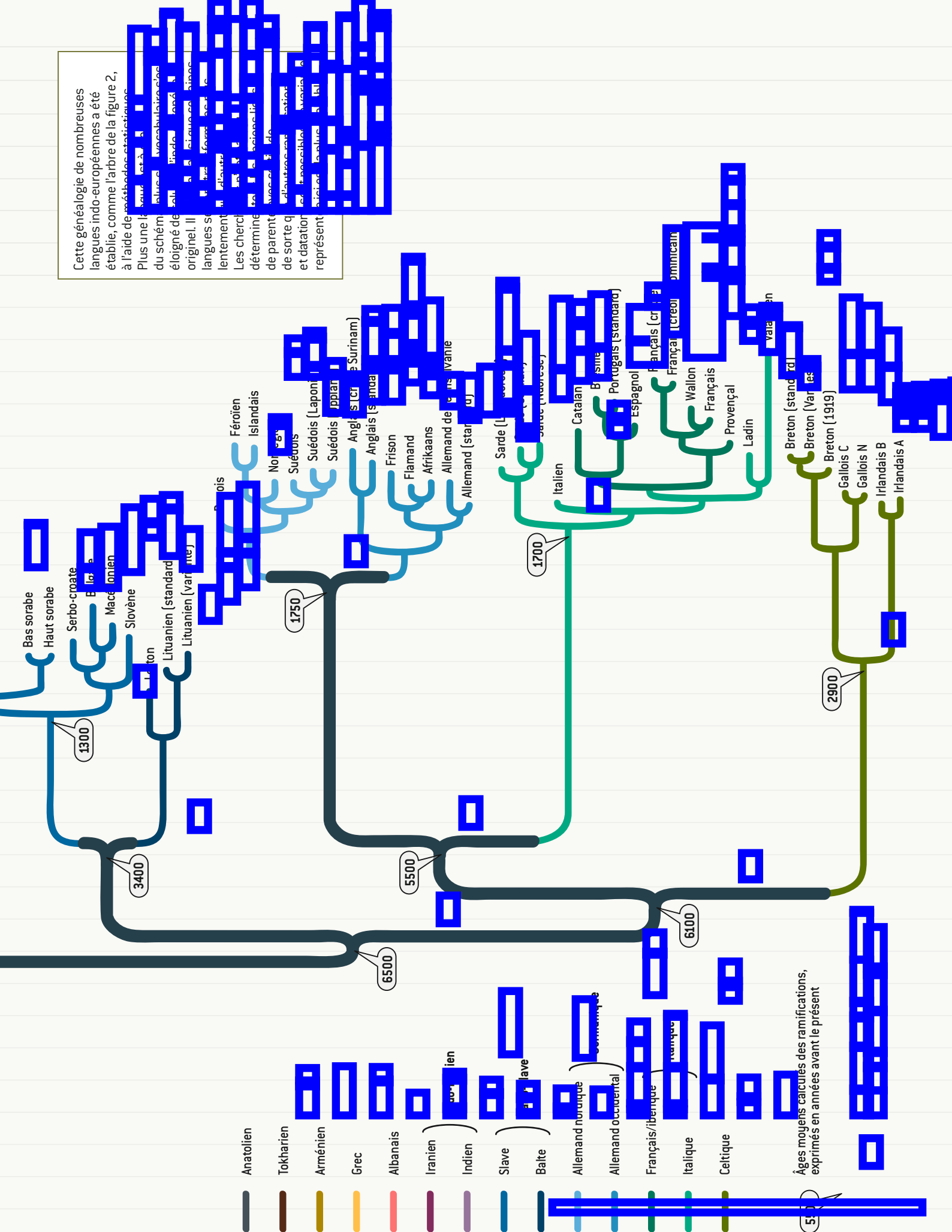
Le même don n'est pas aussi précise qu'il y paraît, les vitesses de modification du vocabulaire étant en fait variables: le contact avec les peuples voisins ou l'adoption d'une langue par un groupe peuvent accélérer

L'archéologie des langues

✓ Les mots désignant le joug, la roue et l'axe sont très semblables dans les langues indo-européennes. On en a conclu que ces objets ont existé avant la ramification de l'indo-européen en langues filles. Ainsi la famille de langues ne daterait pas de plus de 6 000 ans, car la roue n'existait pas auparavant. Les partisans de la thèse d'une ramification antérieure de l'indo-européen essaient au contraire d'expliquer les ressemblances par des emprunts et des apparitions simultanées survenues par hasard.

L'arbre de parenté des langues indo-européennes





Cette généalogie de nombreuses langues indo-européennes a été établie, comme l'arbre de la figure 2, à l'aide de méthodes statistiques. Plus une langue est éloignée de l'original, il y a plus de changements. Les chercheurs déterminent le parent de sorte que les dates et datation représentent

Indo-européen ou indo-germanique ?

✓ Ces expressions sont toutes deux correctes. Le terme « indo-germanique » fait allusion aux composantes de la famille des langues indo-européennes rencontrées à l'extrême Sud-Est et Nord-Ouest (Sri Lanka et Islande respectivement) de l'aire de répartition de ces langues. Ce terme s'est imposé dans l'espace linguistique allemand ; ailleurs en Europe c'est le terme « indo-européen » qui prévaut. Dans certains cercles allemands, le terme « indo-germanique » est tombé en disgrâce après la Seconde Guerre mondiale, en raison de sa connotation trop nationale.

l'échange de mots. Les auteurs se sont efforcés de prendre en compte de tels impondérables. Et d'après O. Atkinson et R. Gray, les faiblesses de la méthode sont largement compensées par l'utilisation d'un grand nombre de langues et de mots.

L'arbre établi par ordinateur (voir l'illustration pages 36 et 37) ne surprend pas et étaye des hypothèses qui ont été élaborées par des méthodes classiques. Par exemple, le statut de langue isolée de l'albanais se voit confirmé. De même, les grands groupes de langues actuelles, germaniques, romanes, slaves, etc., sont correctement représentés.

Mais la datation est-elle fiable ? Il ne faut pas se laisser leurrer par les valeurs plausibles pour la période historique (par exemple celle de la ramification des langues germaniques et romanes en leurs branches actuelles il y a au moins 1700 ans), car c'est précisément avec de telles dates déduites de connaissances historiques que la méthode a été étalonnée. Supposons ainsi que, pour les dates plus anciennes, elle fournisse au moins une approximation. Après tout, des analyses ultérieures ont conduit à des résultats similaires (voir la figure 2).

D'après la simulation, la première ramification de la langue originelle proto-indo-européenne s'est produite il y a déjà près de 8700 ans. L'hypothèse de Gimbutas serait donc réfutée. Les peuples de cavaliers des steppes de la Russie méridionale que Gimbutas considérait comme étant les précurseurs du proto-indo-européen, ont vécu plus de 2000 ans trop tard pour être

les Indo-Européens originels. Une ramification du proto-indo-européen originel il y a environ 9000 ans est en revanche en accord avec la thèse de C. Renfrew. En Grèce orientale, les premières traces d'agriculture sont décelées à peine plus tard ; elles proviennent de l'Anatolie voisine et c'est précisément en bas que l'arbre généalogique situe, avec le hittite, la plus ancienne branche des langues indo-européennes.

Un cerceau anatolien ?

Il y a tout de fois une difficulté. Le hittite n'est attesté qu'au II^e millénaire avant notre ère, de milliers d'années après la diffusion de l'agriculture. L'arbre ne révèle pas si le préhittite parlé il y a plus de 8700 ans doit aussi être situé en Anatolie, car il ne contient pas d'indications de lieu. Des localisations actuelles ou historiques peuvent tout au plus apporter de maigres indices. Les langues ne sont pas attachées à un lieu. Le celtique, aujourd'hui limité à la Bretagne et aux îles Britanniques, était autrefois parlé de l'Espagne jusqu'à l'Euphrate. Le turc, principale langue actuelle de l'Anatolie, n'y est arrivé qu'au haut Moyen Âge.

Les langues se déplacent ou disparaissent. L'histoire de l'Europe, de l'Est de l'Asie et des Indo-Européens s'étend sur neuf millénaires, au cours desquels des langues se sont déplacées, se sont modifiées ou ont disparu sans laisser de traces. C'est pourquoi nous ignorons quelle langue on parlait en Anatolie il y a plus de 8000 ans. D'après la thèse de C. Renfrew, il s'agissait du proto-indo-européen, qui serait ensuite arrivé avec l'agriculture dans les Balkans et serait devenu le précurseur du grec et de l'albanais. Le préhittite serait resté isolé en Anatolie, tandis que les autres langues indo-européennes auraient continué à diverger en Europe. Il aurait donc existé dans les Balkans et en Anatolie une continuité indo-européenne de plus de 8000 ans.

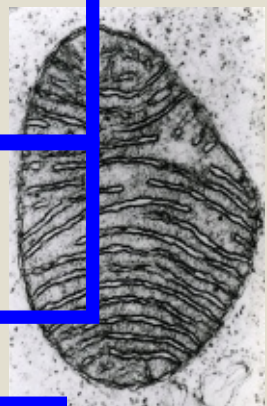
Mais il est aussi possible qu'il en fût autrement. L'écriture la plus ancienne d'Europe déchiffrée partiellement, est le linéaire A sur l'île de Crète. Elle témoigne d'une langue qu'il a été impossible jusqu'ici de classer dans la famille indo-européenne. On débata aussi d'une origine non indo-européenne pour la langue des Pélasgiens, peuple préhistorique de la Grèce pratiquant l'agriculture, ainsi que celle des habitants de la haute Antiquité des îles de Limnos et de Chypre. Et l'hittite ? Lorsque les

Quelle fiabilité pour l'ADN mitochondrial ?

Les mitochondries (ci-contre) sont des organites cellulaires qui ont leur propre matériel génétique. L'ADN mitochondrial n'est transmis que par la mère, mute souvent, présente de multiples copies et peut être extrait plus souvent d'os anciens que l'ADN nucléaire. On l'utilise pour retrouver la trace des migrations préhistoriques de différents peuples.

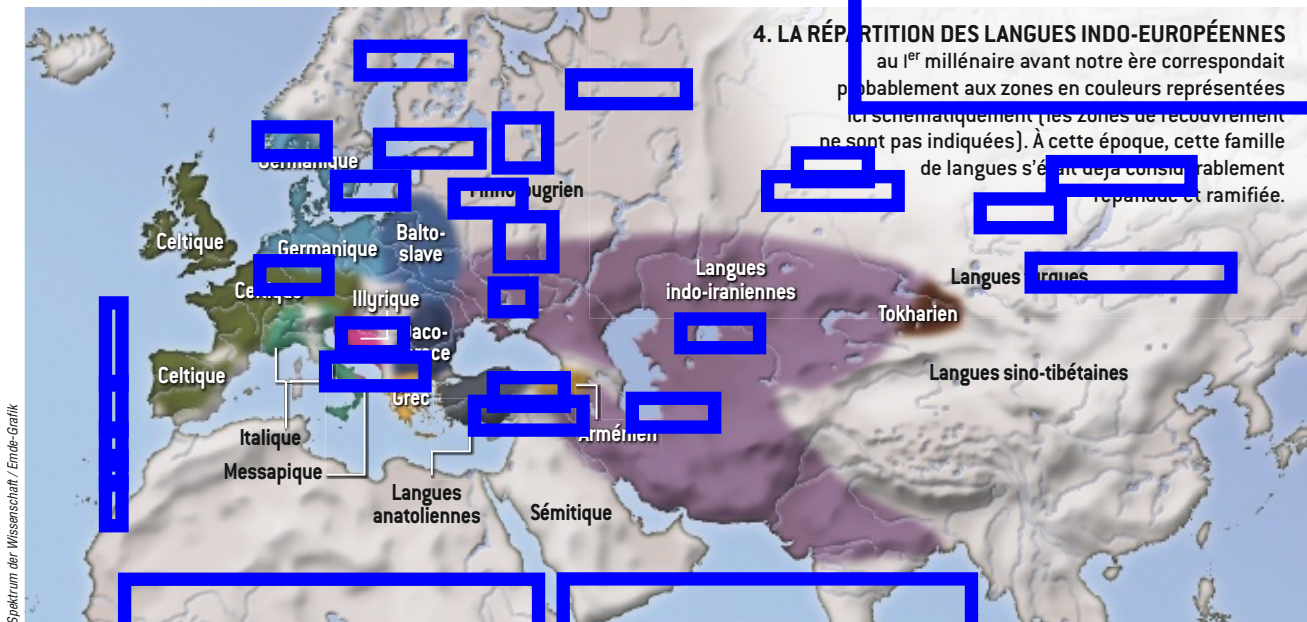
Il ne constitue toutefois pas un indicateur très fiable pour établir la filiation et la présence de parenté. D'une part, le génome nucléaire peut avoir une origine en partie différente

de celle des mitochondries. D'autre part, les différents variants de l'ADN mitochondrial ne sont pas seulement des marqueurs de parenté



dépourvus de fonction. Certains variants sont associés à des particularités du métabolisme ou à une vulnérabilité à certaines maladies.

Dans la répartition actuelle des mitochondries, il est probable que la sélection soit intervenue tout autant que la parenté. Par exemple, le variant mitochondrial N pourrait avoir disparu par sélection chez les agriculteurs. La céramique rubanée, bien que ses porteurs soient peut-être nos ancêtres.



Hittites commencèrent à y écrire, ils ont immortalisé, en même temps que leur propre langue indo-européenne, celle de l'État de leurs prédécesseurs Hatti, dont ils ont adopté la culture et la capitale. Cette langue n'était certainement pas indo-européenne. Il n'est donc nullement établi que les premiers agriculteurs d'Anatolie ou de Grèce aient été des Indo-Européens.

Un arbre très ramifié il y a après de 6 000 ans

Ainsi, l'arbre auquel sont parvenus R. Gray et Q. Atkinson, avec ses dates, est certes compatible avec la thèse selon laquelle l'indo-européen est arrivé en Europe avec l'agriculture, mais il ne peut la prouver.

L'arbre contient en revanche une autre date qui captive les chercheurs. Outre les langues disparues ou isolées comme le hittite ou le grec, il fixe aussi l'origine des grandes familles de langues indo-européennes : l'indo-iranien, le balte, le slave, le celtique, le romano-italique et le germanique. Toutes ces familles ont une origine commune, qui se situe environ 2 000 ans après la divergence de l'hittite. La ramification en grandes familles existant aujourd'hui s'est alors produite dans une fenêtre temporelle de 1 400 ans seulement. Cela indique des migrations postérieures à la plus ancienne diffusion de l'agriculture. La première des grandes familles actuelles à diverger, il y a 6 900 ans, fut l'indo-iranien. Ont ensuite suivi les familles de langues du Nord-Est de l'Eu-

rope, le balte et le slave. Il y a 6 100 ans, le celtique s'est séparé du tronc. Enfin, il y a 5 500 ans, le reste s'est ramifié en germanique et en italique.

Selon C. Renfrew, cette énorme vague de migration, sur laquelle repose le succès des langues indo-européennes sur un vaste territoire, est partie des Balkans. Il ne s'agit bien sûr que d'une option. Un coup d'œil sur la carte suggère une autre possibilité : la vague de ramifications et de migrations est peut-être partie des steppes du Nord de la mer Noire, c'est-à-dire de la région habitée par les peuples des steppes qui ont la faveur de Gimbutas. De là-bas, on arrivait facilement en Iran, et à la ramification de l'indo-iranien, aussi bien qu'en Europe de l'Est avec la ramification des langues baltes et slaves. On dispose même d'un élément qui étaye la présence très ancienne d'Indo-Européens dans la région de la mer Noire : les noms que portent les fleuves qui y coulent. Don, Dniepr, Dniestr, Danube, tous ces noms ont une racine indo-européenne, qui est le terme du vieux persan et du vieux celtique désignant le fleuve (*danu*).

Pour ce qui est de l'origine des Indo-Européens, les peuples des steppes sont donc toujours en lice. Il est possible qu'ils aient contribué à la répartition actuelle des langues indo-européennes. La vérité se situe sans doute quelque part entre les thèses de C. Renfrew et de Gimbutas. Une chose est sûre : dans ce domaine, les hypothèses les plus simples ne sont pas forcément les meilleures. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

B. Bramanti *et al.*, Genetic discontinuity between local hunter-gatherers and Central Europe's first farmers, *Science*, vol. 326, pp. 137-140, 2009.

H. Chandler *et al.*, Using ancient DNA to examine genetic continuity at the Mesolithic-Neolithic transition in Portugal, dans P. Arias *et al.* (éd.), *Actas del III Congreso del Neolítico en la Península Ibérica*, Santander, pp. 781-786, 2005.

R. D. Gray et Q. D. Atkinson, Language trees diverge in time support the Anatolian theory of Indo-European origin, *Nature*, vol. 426, pp. 435-438, 2003.

E. Hamel *et al.*, *Vascones*, Le vascon, première langue d'Europe, *Pour la Science*, n° 299, septembre 2002.

Collectif, *Les langues du monde*, Bibliothèque Pour la Science, 1999.

M. Ruhlen, *L'origine des langues*, Belin, 1997.

Aperçus

de la science de demain

POUR LA SCIENCE 100

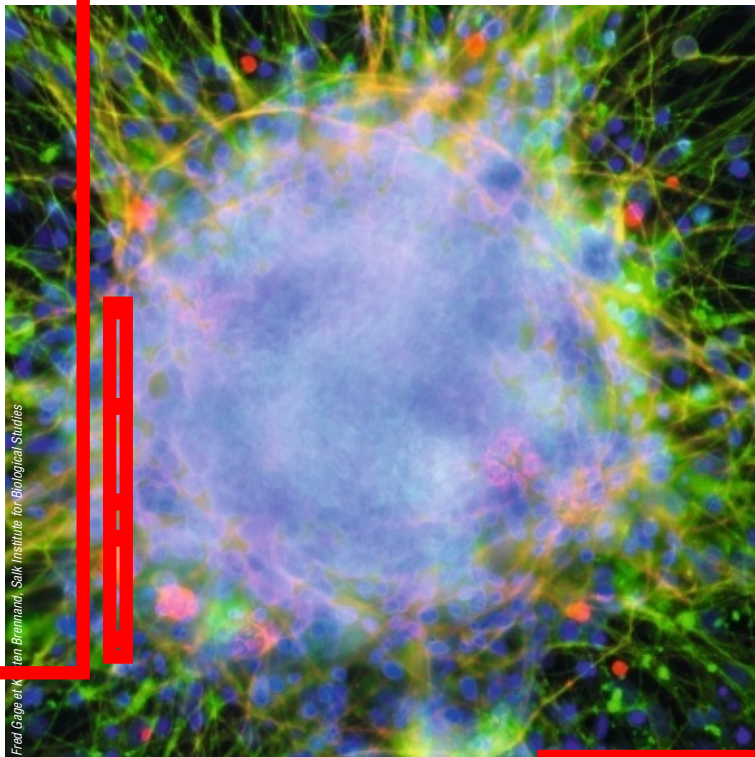
Évidemment, pour être au point, les grandes avancées scientifiques des prochaines années. Mais les découvertes ne jaillissent pas de nulle part, elles viennent aux esprits préparés qui savent, en outre, comprendre l'importance de l'inattendu. Aussi, pour son 400^e numéro, *Pour la Science* ne se tourne pas vers le passé mais vers l'avenir, et vous propose un florilège de champs de recherche propices aux découvertes. En quelques pages alliant des illustrations surprenantes et un résumé de l'état de l'art, nous vous convions à un voyage vers le futur.

Sans prétendre être exhaustifs, nous avons choisi, pour illustrer ces terrains fertiles, les cellules souches, le graphène, l'imagerie cérébrale, les exoplanètes, la chimie macromoléculaire, les particules élémentaires, le rayonnement du fond diffus cosmologique, la biologie synthétique, la science des réseaux, la biodiversité, les nanosciences, la modélisation informatique, l'épigénétique et les métamatériaux.

La rédaction

LES CELLULES SOUCHES.

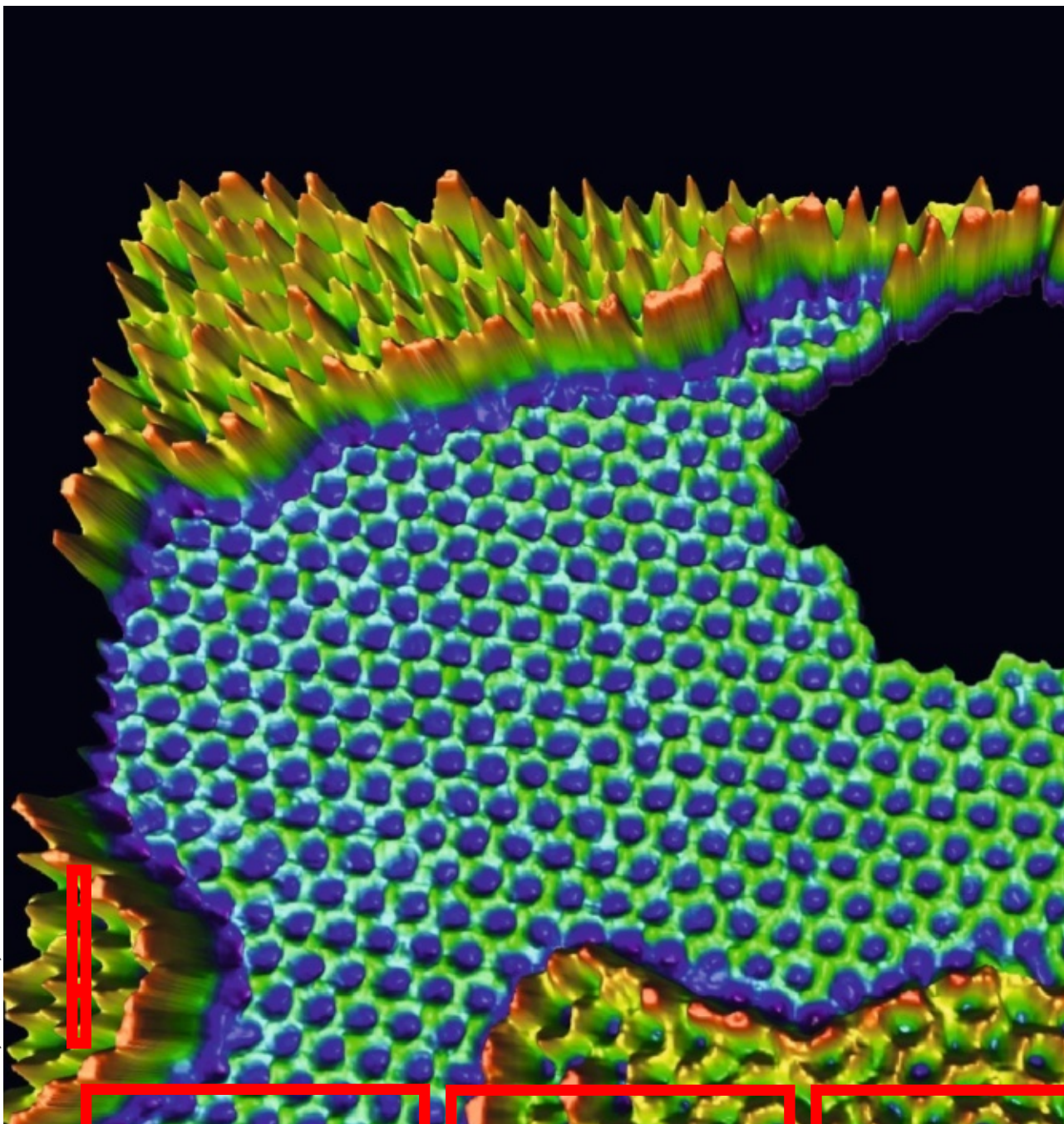
Ces neurones, dont on voit les prolongements, ou axones (en vert et jaune), par centaines, se sont formés *in vitro* à partir de cellules souches dites pluripotentes induites. En s'amoncelant, leurs noyaux, colorés en bleu, forment une masse bleutée (en rouge, un marquage de certaines ramifications des neurones, les dendrites). Les cellules souches pluripotentes seront vraisemblablement à l'origine de progrès thérapeutiques. Elles se reproduisent à l'identique presque indéfiniment, et peuvent se transformer – se différencier – en toutes sortes de cellules spécialisées (nerveuses ou musculaires, par exemple) qui pourraient remplacer des tissus lésés. Il existe deux types de cellules pluripotentes : les cellules souches embryonnaires, issues des tout premiers stades du développement d'embryons et, depuis 2006, les cellules souches pluripotentes induites (CSPi), obtenues par reprogrammation de cellules déjà différenciées. Pour former des tissus de remplacement, il faut produire un grand nombre de cellules d'une lignée tissulaire à partir de cellules souches, puis les implanter. Dans l'organisme, ces cellules doivent être fonctionnelles et dénuées de risques. Une application plus immédiate consiste à utiliser les cellules souches induites pour modéliser des maladies. Prélevées sur des patients et différenciées en cellules « malades », elles permettent d'étudier les mécanismes cellulaires et moléculaires de diverses pathologies, et de tester à grande échelle des médicaments potentiels. □



Fred Grappe et Kevin Ten Berend, Salk Institute for Biological Studies

Biomédecine

Lawrence Berkeley National Laboratory



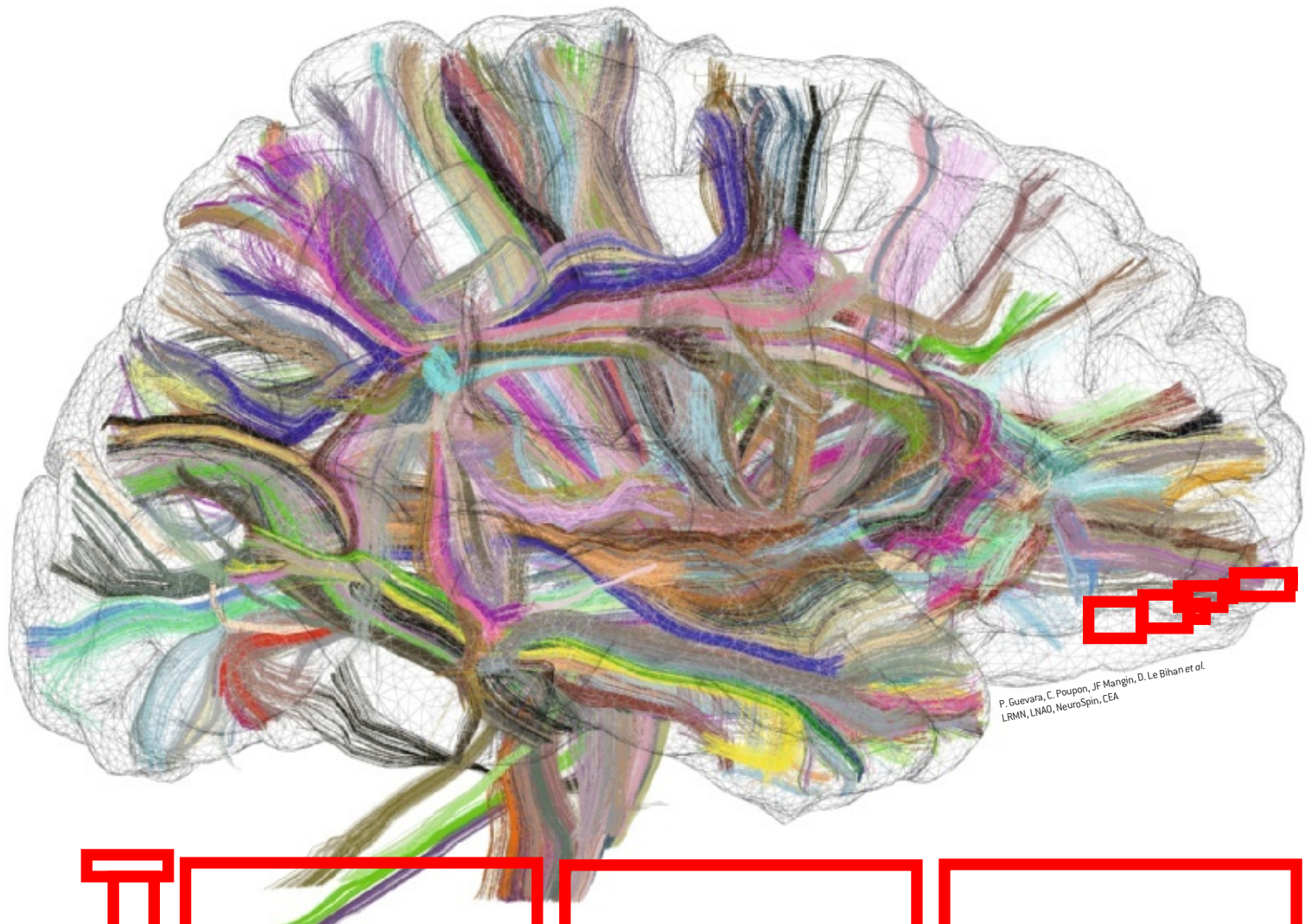
LE GRAPHÈNE. Cette image en fausses couleurs, obtenue par microscopie électronique à transmission, montre un réseau d'atomes de carbone liés entre eux de façon hexagonale (*en vert sur fond bleu*). Une telle couche de carbone d'épaisseur monoatomique est nommée graphène. Le graphite, forme bien connue du carbone, n'est autre qu'un empilement de nombreux feuillets de graphène.

Qu'y a-t-il alors de nouveau ? En fait, des feuillets de graphène n'ont été isolés que très récemment, en 2004. C'est notamment ce qui a valu à Andre Geim et Konstantin Novoselov, de l'Université de Manchester en Grande-Bretagne, le prix Nobel de physique de 2010. Et surtout, l'étude

du graphène a vite révélé que ce cristal bidimensionnel le seul connu à ce jour, a de nombreuses propriétés intéressantes, tant du point de vue fondamental que de celui des applications.

Par exemple, les électrons dans le graphène se comportent comme s'ils étaient de masse nulle, avec une mobilité très élevée à température ambiante. C'est un matériau très transparent, mécaniquement très résistant (200 fois plus que l'acier) et cependant souple. Ses propriétés, activement explorées et encore imparfaitement comprises, laissent envisager de nombreuses applications (détection de molécules uniques, transistors et autres composants électroniques ou optoélectroniques, cellules photovoltaïques, etc.).

Le graphène est la troisième des grandes surprises que nous a réservées le carbone au cours des dernières décennies. La première a été la découverte de la molécule C_{60} en forme de cage sphérique, en 1985, suivie de plusieurs autres molécules du même type (C_{70} , C_{76} , etc.). La deuxième surprise a été l'identification, en 1991, de feuillets de carbone recourbés en tubes de diamètre nanométrique. Les molécules de type C_{60} et les nanotubes de carbone constituent la famille dite des fullènes. Ces structures ont de remarquables propriétés physiques et chimiques, toujours très étudiées. Comme le graphène, elles intéressent beaucoup les ingénieurs et permettent de lier les spécialistes des nanotechnologies.



P. Guevara, C. Poupon, JF Mangin, D. Le Bihan et al.
LRMN, LNAO, NeuroSpin, CEA

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE. Cette représentation du cerveau humain, obtenue par imagerie par résonance magnétique de diffusion (IRM de diffusion), révèle les faisceaux de substance blanche (représentés par les différentes couleurs), chacun de ces faisceaux étant un ensemble de fibres nerveuses. Cette technique permet de sonder et de visualiser la structure des tissus biologiques, notamment cérébraux, à une échelle microscopique : elle illustre les progrès considérables de l'imagerie cérébrale depuis une vingtaine d'années.

Les premières techniques datent du début des années 1980. Il s'agissait surtout de l'imagerie par résonance magnétique et du scanner aux rayons X. Ces méthodes permettaient de voir les structures du cerveau (vivant), mais la résolution spatiale était médiocre, de l'ordre du centimètre. Elles ne révélaient pas forcément les plus petites tumeurs ou les lésions susceptibles de perturber le fonctionnement cérébral. Progressivement, la résolution de ces deux techniques d'imagerie anatomique a été améliorée et atteint aujourd'hui le millimètre, voire quelques dixièmes de millimètre pour les IRM à très haut champ magnétique, mais le grand bouleversement vient des méthodes d'imagerie dites fonctionnelles, qui

mesurent en temps réel l'activité des régions cérébrales lors de certaines tâches. Par exemple, l'IRM fonctionnelle ou la tomographie par émission de positrons ont aujourd'hui une résolution temporelle de l'ordre de la seconde, c'est-à-dire que l'on peut « filmer » le cerveau en action à raison d'une image par seconde.

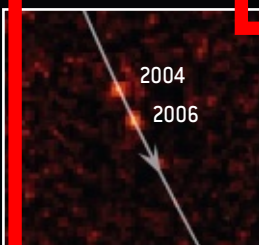
Ces différentes techniques ont des applications médicales et permettent d'étudier le fonctionnement du cerveau. On peut par exemple localiser des foyers épileptiques, repérer des tumeurs, même millimétriques, et des hémorragies cérébrales. Or des diagnostics précis et rapides accablent une prise en charge précoce, ce qui augmente les chances de guérison et limite les séquelles. Quant à l'étude du cerveau, on observe aujourd'hui comment il s'active lors d'une tâche cognitive ou motrice. Mais le chemin est encore long entre la mise en évidence de l'activité associée à une tâche et la mise en évidence de l'activité cérébrale qui sous-tend la conscience.

Que nous réservent les années à venir ? Les techniques devraient améliorer les résolutions spatiales et temporelles et l'on espère combiner ces deux sortes de résolution, avec de bonnes

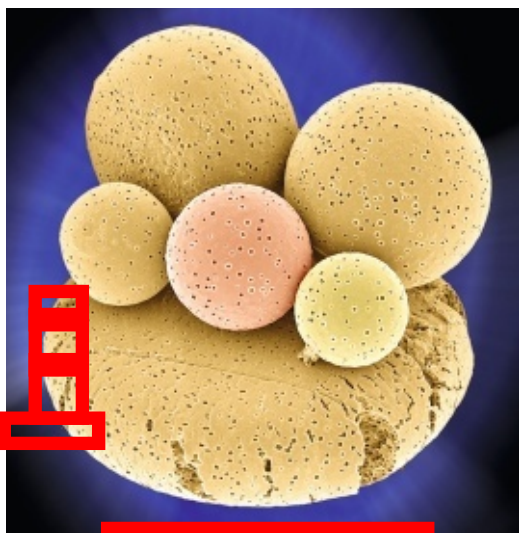
valeurs pour chacune. Quant à l'IRM de diffusion, elle offre une approche unique pour étudier *in vivo* l'architecture fine du tissu cérébral et de ses changements physiologiques ou pathologiques ; elle est en train de se transformer en un véritable microscope capable de voir à distance, sans prélèvement tissulaire.

Cette méthode reste un outil de choix pour le diagnostic des ischémies cérébrales (privations d'oxygène d'une région du cerveau) : avec une sensibilité sans égale, l'IRM de diffusion permet à certains patients de recevoir un traitement adapté en urgence, avant que la zone lésée soit importante. En outre, elle permet d'observer le câblage intracérébral et reste aujourd'hui le seul outil utilisable *in vivo*. Cette « tractographie » cérébrale, jointe à l'IRM fonctionnelle, ouvre une voie nouvelle pour l'étude de la connectivité cérébrale et de ses pathologies, par exemple psychiatriques qui représentent un enjeu de santé publique majeur. La dernière avancée concerne la détection rapide de l'activation neuronale : les cellules cérébrales actives changent de structure, ce qui entraîne des modifications du signal d'IRM de diffusion. Cela devrait bouleverser l'imagerie neurofonctionnelle.

LES EXOPLANÈTES. Non, ce n'est pas l'œil du Seigneur, mais un disque de poussière autour de l'étoile Fomalhaut (*masquée, au centre*), qui abrite une planète trois fois plus massive que Jupiter (*voir le cartouche*). Quinze ans après la découverte de la première exoplanète, autour d'une étoile de type solaire, on en connaît aujourd'hui plus de 500. Avec une variété bien plus grande qu'on ne l'aurait imaginé : des planètes géantes très proches de leur étoile, d'autres autour d'étoiles ratées ou de cadavres stellaires... Comment ces systèmes se sont-ils formés ? Le Système solaire est-il une exception ? Et, surtout, existe-t-il des planètes semblables à la Terre ? Ces questions restent ouvertes. Des « super-Terres » à peine plus massives que la nôtre ont été détectées récemment, et les télescopes CoRoT et Kepler devraient en découvrir des dizaines dans les années à venir. Quelles sont les conditions qui y règnent ? Si l'on parvient depuis peu à analyser l'atmosphère des planètes géantes gazeuses en transit devant leur étoile, pour les planètes de type terrestre, il faudra attendre des instruments plus puissants. Avec l'espoir de découvrir, bientôt, une jumelle de la Terre. Et peut-être la vie ?

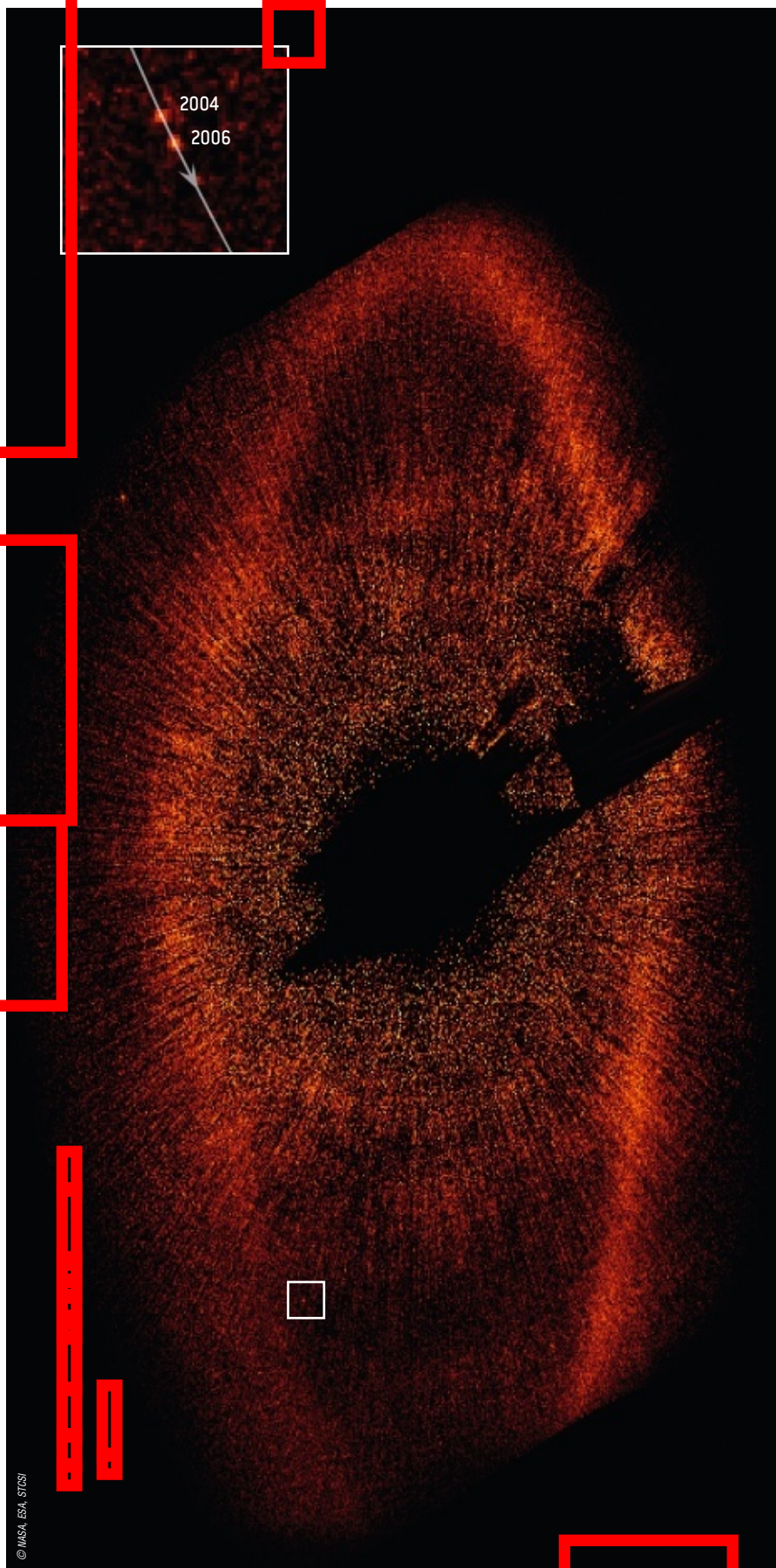


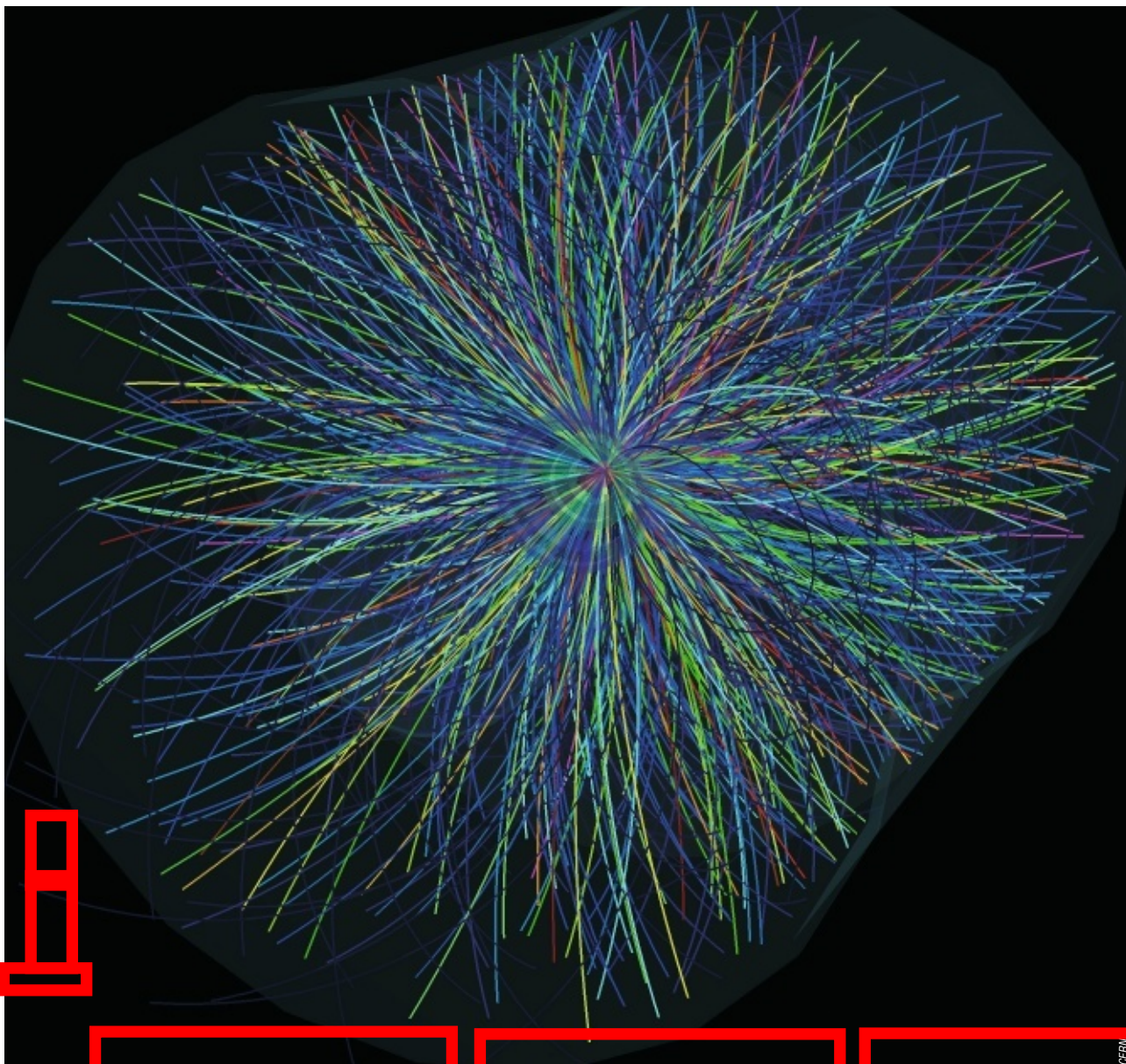
LA CHIMIE MACROMOLÉCULAIRE. Ces microcapsules de polymères criblées de minuscules trous contiennent une substance active (par exemple un parfum) et font moins de 0,1 millimètre de diamètre. On les obtient en agitant une solution de polymère et le parfum, dans une solution aqueuse qui comporte un stabilisant ; lorsqu'on élimine le solvant par évaporation contrôlée, les gouttelettes piègent la substance active dans une gangue solide de polymère. De telles capsules ont été insérées notamment dans des peintures, qui restent ainsi odorantes pendant des années (pour des sanitaires par exemple). À l'avenir, des capsules nanométriques pourraient transporter dans l'organisme, voire dans les cellules, des médicaments, par exemple des substances anticancéreuses, des cellules souches, des gènes. On traiterait ainsi de façon ciblée des tissus malades ou l'on détruirait spécifiquement des tumeurs. Reste toutefois à trouver un marqueur spécifique du tissu biologique visé, capable de guider la capsule vers son site d'action, et à le greffer à la surface des nanoparticules.



© CNRS Photothèque, UMR5635, Inht, Europ. des membranes (I. E. M.)

© NASA, ESA, STScI





LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES. ALICE s'est mise en marche pour remonter le temps. Ces multiples jets colorés issus d'un même point représentent la reconstitution par ordinateur des trajectoires des diverses particules produites lors d'une violente collision entre deux ions de plomb. C'est l'un des innombrables événements enregistrés en novembre 2010 par le détecteur ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*), au CERN à Genève.

ALICE est l'une des grandes « expériences » menées au LHC (*Large Hadron Collider*), le grand collisionneur de hadrons récemment mis en service, où les énergies de collision sont inédites. Le LHC accélère soit des protons, soit des ions de plomb. Six détecteurs, dont ALICE et trois autres de très grande taille, ATLAS, CMS et LHCb, ont été construits pour y mener diverses expériences. ATLAS et CMS traquent le boson de Higgs. Cette particule, qui n'a pas encore été mise en évidence,

est prédite par le modèle standard, la théorie actuelle des interactions électromagnétique, faible et forte.

En cette ère où la construction d'un accélérateur géant tel que le LHC dure autant que la carrière d'un physicien, la découverte de cette particule est un enjeu essentiel, car le boson de Higgs est l'un des ingrédients clés de la logique du modèle standard. S'il n'est pas découvert, la construction du collisionneur LHC aura-t-elle été inutile ? Sans doute pas : les physiciens seraient très étonnés que le LHC n'apporte pas de trouvailles conséquentes.

En effet, depuis plus de 25 ans, les théoriciens du monde subatomique attendent des résultats expérimentaux importants pour guider leurs spéculations. ATLAS et CMS révéleront peut-être des particules inattendues, que les théoriciens s'empresseront d'exploiter, soit pour départager les idées concurrentes, soit pour ouvrir des pistes originales.

Il est aussi possible que les autres expériences du LHC fournissent des découvertes inattendues. L'expérience LHCb sur la violation de la symétrie C, liée à l'asymétrie matière-antimatière, en est une première source potentielle. ALICE en est une autre. Ce détecteur de 10 000 tonnes mesure les produits de collisions frontales entre ions de plomb. Ces expériences visent à étudier le changement d'état de la matière qui se produit lorsqu'on détruit les liaisons créées par l'interaction forte. Dans le plasma quarks-gluons ainsi créé, les constituants (quarks et gluons) des protons et des neutrons sont à peu près libres. Cet état n'existe que dans des conditions extrêmes, analogues à celles qui régnaient aux premiers instants de l'Univers. C'est pourquoi ALICE constitue une sorte de machine à remonter le temps. ALICE est-elle sur le point de nous ouvrir un nouveau pays de merveilles... scientifiques ?

LE RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE.

Sur cette image du ciel en micro-ondes, on distingue, en arrière-plan du disque de la Voie lactée et du milieu interstellaire, le motif granulaire du fond diffus cosmologique. C'est pour cartographier avec précision ce fossile de la première lumière émise dans l'Univers qu'a été lancé en 2009 le satellite *Planck*.

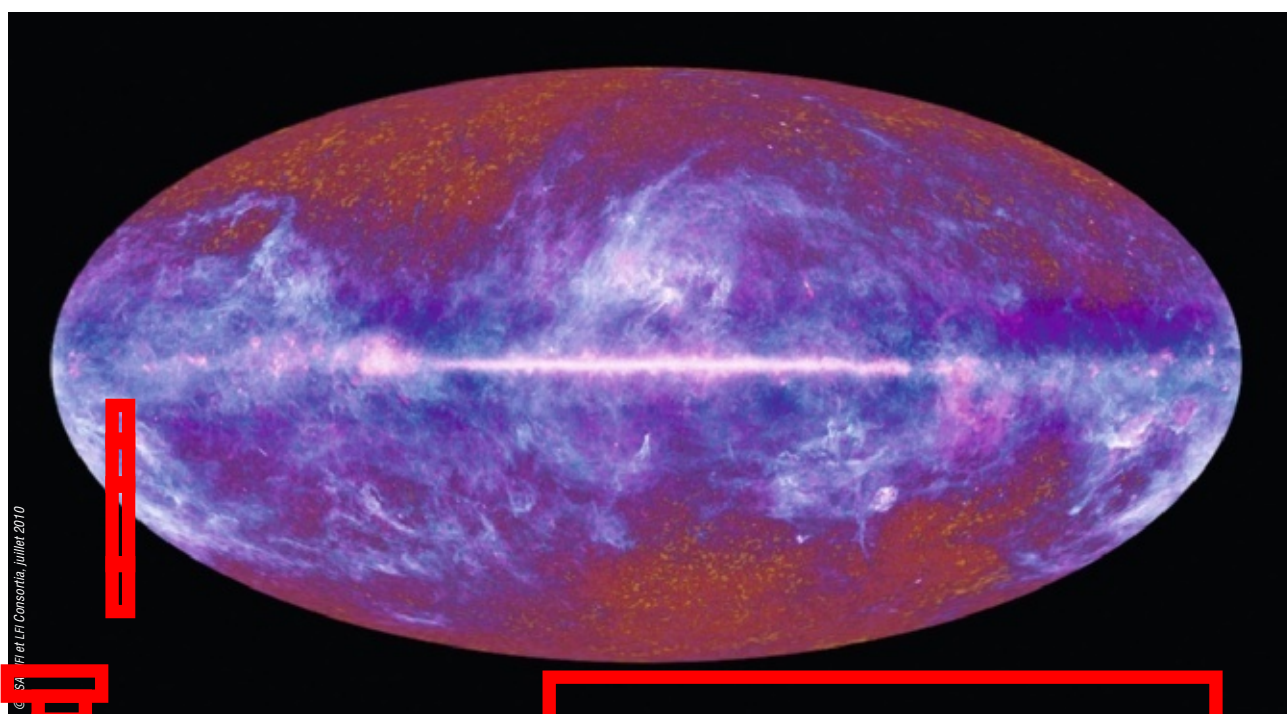
Le rayonnement du fond diffus a été émis 380 000 ans après le Big Bang, lorsque les électrons se sont recombinés aux noyaux pour former les atomes. C'est un élément-clé du modèle standard de la cosmologie, qui décrit comment l'Univers a évolué en se dilatant et en se refroidissant à partir d'une phase chaude et dense.

Le tableau est aujourd'hui le suivant : la matière usuelle, ou baryonique, ne représente que quatre

pour cent du contenu en énergie du cosmos. Le reste se partage entre la matière noire (24 pour cent), composée de particules massives sans interactions avec la matière ordinaire, et l'énergie sombre (72 pour cent), qui crée une répulsion gravitationnelle et provoquerait l'accélération de l'expansion cosmique. Dans les premières fractions de seconde, une brève phase d'expansion accélérée, l'inflation, a homogénéisé le contenu de l'Univers et engendré les infimes fluctuations de densité détectées dans l'image du fond diffus. Ces fluctuations de densité ont par la suite donné naissance, par l'action de la gravité, aux galaxies et amas de galaxies. Mais de nombreuses questions demeurent. Que sont la matière noire et l'énergie sombre ? Existe-t-il des modèles alternatifs qui s'en passent ? Quel est le moteur

de l'inflation ? Quelle est la bonne théorie physique pour décrire l'Univers primordial ?

En améliorant la résolution et la sensibilité de la carte des fluctuations du fond diffus, le satellite *Planck* apportera des éléments de réponse. Préciser les proportions de matière baryonique, de matière noire et d'énergie sombre permettra de mieux contraindre les hypothèses sur leur nature, de mieux tester les prédictions sur la nucléosynthèse ou de vérifier que la courbure de l'Univers est nulle. Par ailleurs, *Planck* livrera la première carte précise de la polarisation du fond diffus, qui pourrait révéler la trace d'ondes gravitationnelles primordiales. Tous ces résultats, et d'autres, telle la cartographie des grandes structures, permettront d'affiner les modèles d'évolution de l'Univers. □



© ESA / Planck Consortium, juillet 2010



J. Craig Venter Institute

LA BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE. Ces cellules, vues ici en microscopie électronique à transmission, ont fait parler d'elles en mai 2010. Elles ont été reprogrammées au moyen d'un génome synthétique : des chercheurs de l'Institut J. Craig Venter, aux États-Unis, ont synthétisé un génome presque identique à celui d'une bactérie connue et l'ont introduit dans une espèce bactérienne proche. Après la division cellulaire, les cellules filles qui en avaient hérité ont changé d'identité, se mettant à produire les protéines codées par le génome synthétique. Ces travaux ont inauguré l'ère de la biologie synthétique. La méthode, nouvelle étape du génie génétique, est simple en théorie : identifier des séquences génétiques qui remplissent des fonctions souhaitées, les combiner pour obtenir des fonctions plus complexes, et les insérer dans des cellules, qui exécuteront alors ces fonctions.

Les applications potentielles sont multiples : spécialiser des cellules dans la production de molécules utiles ou dans la capture du dioxyde de carbone, les rendre résistantes à des virus, voire, à plus long terme, faire revivre des bactéries anciennes ou créer de nouveaux organismes... Mais les obstacles sont nombreux. On est loin de connaître tous les gènes nécessaires à une tâche, le rôle des autres constituants cellulaires, l'impact de la réduction du génome sur l'adaptabilité d'une cellule, etc. Et il faut que les travaux s'accompagnent de toutes les précautions éthiques et expérimentales nécessaires. □



LA SCIENCE DES RÉSEAUX. Il ne s'agit pas d'un feu d'artifice, mais d'une représentation graphique du réseau des interactions entre les trois quarts des quelque 6 000 gènes de la levure de bière, *Saccharomyces cerevisiae*.

Sur cette cartographie d'environ cinq millions d'interactions génétiques, publiée début 2010 par une équipe majoritairement canadienne, les nœuds du réseau correspondent à des gènes, et deux nœuds sont reliés entre eux si les deux gènes qu'ils représentent interagissent. Les groupes de nœuds d'une couleur donnée figurent des gènes intervenant dans un type de fonctions de la cellule. Par exemple, les nœuds en jaune représentent des gènes impliqués dans la sécrétion de

vésicules intracellulaires et leur transport, tandis que les nœuds en vert clair sont liés aux fonctions de réplication et de réparation de l'ADN.

L'analyse détaillée d'un tel réseau aide à comprendre le fonctionnement du système représenté. D'autant que, depuis plusieurs années, sous l'impulsion notamment d'Albert-Lászlo Barabási, aux États-Unis, se développe l'étude générale des réseaux indépendamment des objets concrets qu'ils représentent. Qu'il s'agisse du réseau Internet des relations entre individus au sein d'une communauté, des connexions entre neurones dans le cerveau, du réseau de distribution de l'électricité, des réseaux de contacts humains par lesquels se propage une épidémie, des chaînes

alimentaires dans le monde vivant, etc., des propriétés universelles se révèlent parfois.

Ainsi, malgré l'apparence désordonnée des réseaux complexes, l'approximation consistant à les considérer comme des assemblages aléatoires de nœuds et de liens n'est, le plus souvent, pas valable. Les chercheurs ont par exemple découvert que beaucoup de réseaux très différents sont « invariants d'échelle », c'est-à-dire que la probabilité qu'un nœud soit connecté à n autres nœuds est proportionnelle à une certaine puissance de n .

La recherche de telles propriétés universelles caractérisant l'architecture et le fonctionnement des réseaux, qu'ils soient fixes ou changeants, est un domaine en plein essor.

LA BIODIVERSITÉ. Ce crustacé copépode long d'un demi-millimètre, *Oratonotus steiningeri*, a été découvert en 2006 dans le cadre du Recensement de la vie sous-marine (*Census of Life*) par 5 400 mètres de fond, au large de l'Angola, puis dans le Pacifique.

C'est l'une des 5 000 espèces nouvelles pour la science collectées depuis 2000 par ce recensement. Les océans sont tout un monde qui reste à explorer, notamment à plus de 1 000 mètres de profondeur. Alors que les scientifiques ont décrit 250 000 espèces marines environ, il en existe peut-être plus d'un million, micro-organismes mis à part – lesquels représenteraient 90 pour cent de la masse de tous les organismes marins. Ainsi, il resterait environ 5 000 poissons marins inconnus (près de 17 000 ont été décrits). Et 75 pour cent des espèces vivant en profondeur en Méditerranée resteraient à collecter et à décrire. Dans les forêts tropicales, qui abritent 50 à 75 pour cent de la biodiversité terrestre, des dizaines de milliers d'espèces sont aussi à découvrir, si leur rythme d'extinction, 100 à 1 000 fois plus rapide qu'avant l'ère industrielle, en laisse le temps.

Ce sont surtout des arthropodes et des végétaux, mais aussi des oiseaux et des mammifères. De quoi justifier nombre

de missions naturalistes sur le terrain et des mesures concrètes de protection. La Terre reste à explorer... et à préserver.



© Jean-Michel Peltis

LE NANOMONDE. Ces flocons sont en or et ne mesurent que deux micromètres de diamètre et 10 nanomètres d'épaisseur. Déposés sur une plaque de verre par micrographie électronique, c'est-à-dire à l'aide d'un faisceau d'électrons, ils illustrent les possibilités des nanosciences et des nanotechnologies.

Les termes de nanosciences et de nanotechnologies se sont peu à peu imposés pour décrire les recherches et la construction de systèmes de tailles comprises entre le micromètre et le nanomètre, c'est-à-dire le milliardième de mètre. Il ne s'agit donc ni d'une nouvelle science ni d'une nouvelle branche technique, mais d'un ensemble d'études et de réalisations mettant en jeu des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques portant sur de petits groupes d'atomes et de molécules. C'est

souvent le caractère quantique des phénomènes en question qui les rend utiles pour créer « nanomachines », « nanomatériaux » et autres « nanodéclenchements », autrement dit des dispositifs nanométriques dotés des fonctions (mécaniques, optiques, chimiques, électroniques, biologiques ou médicales) souhaitées.

L'idée de constructions à l'échelle moléculaire fut évoquée dès les années 1950 par Richard Feynman, puis popularisée par certains ingénieurs et auteurs de science-fiction, qui la présentent comme le moyen de transformer la Terre en un paradis technique, ou au contraire en un enfer où les humains ne pourront se défendre contre des objets plus petits que leurs cellules...

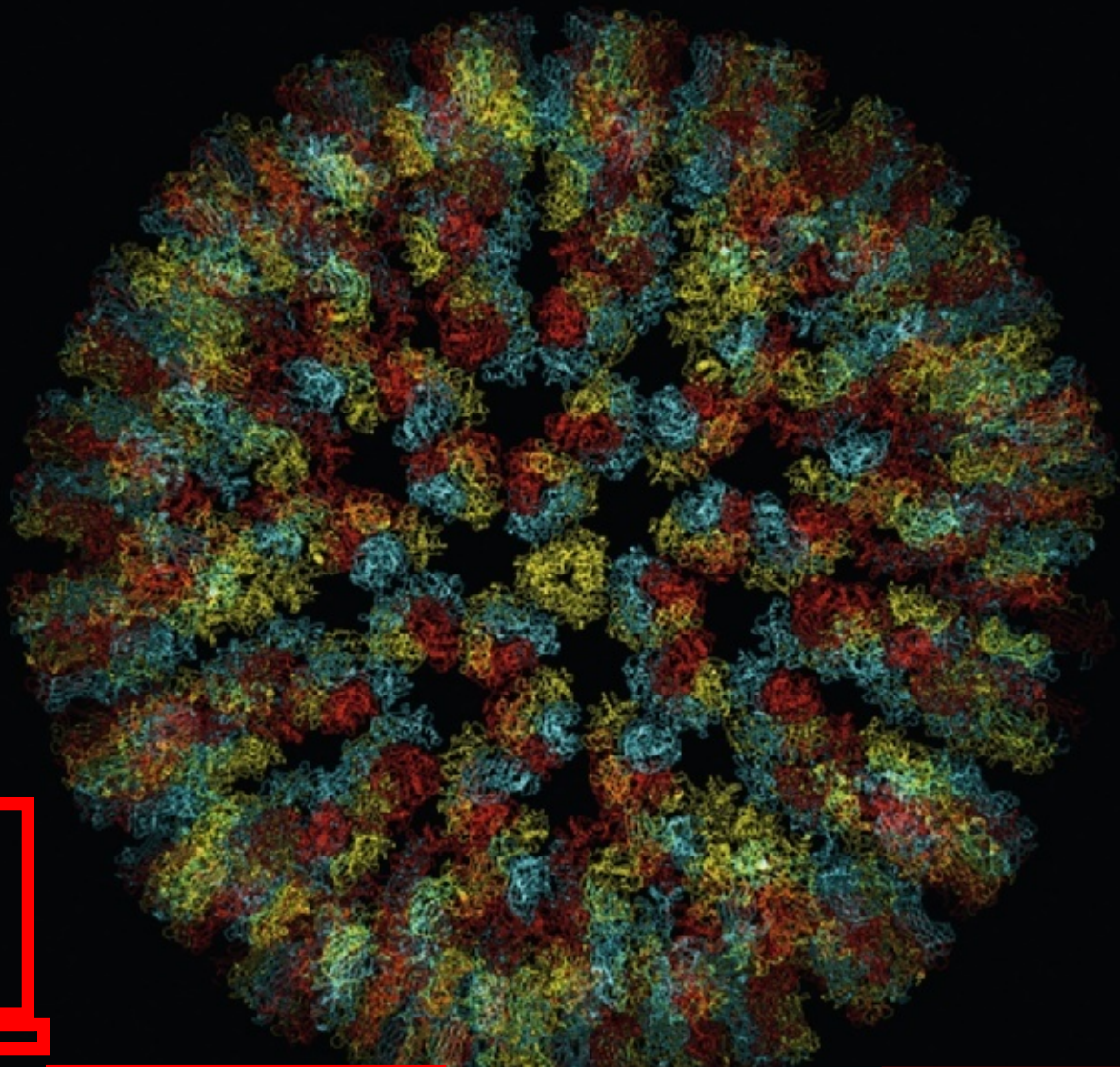
Les nanosciences et les nanotechnologies se développent grâce à un éventail toujours plus grand de techniques permettant d'étudier et d'agir

à l'échelle nanométrique : microscopie optique, électronique ou à sonde locale, microstructuration des surfaces (par photolithographie, micrographie électronique, etc.), manipulations à l'échelle moléculaire (mécanosynthèse, auto-assemblage moléculaire, etc.).

Cette domaine est riche de travaux variés : la « neige » d'aujourd'hui sert par exemple à l'étude fondamentale des ondes électroniques de surface nommées plasmons. Du côté des applications, de plus en plus de laboratoires sur puce, de micromoteurs électriques, de lasers miniaturisés, de composants nanoélectroniques et d'autres microsystèmes apparaissent. Et les perspectives étonnantes ne manquent pas : on parle de nanorobots mobiles à l'intérieur du corps, d'essaims de microrobots domestiques, de robots de combat imparables parce qu'invisibles... □



© CNRS/Photobanque/SM/Université de Bordeaux 1 / P. Lhuillier, N. Marquèsant, D. Talaga, UMR5230 - Institut des sciences moléculaires



© CNRS / Photothèque F. Rey, J. Cohen, B. V. V. Prasad, UMR 2472 - Virologie moléculaire et structurale

LA MODÉLISATION INFORMATIQUE. La rosace de quelque cathédrale moderne ? Non... Réalisée en 2004 à partir de données cristallographiques et d'observations en microscopie électronique, cette structure modélise le rotavirus responsable des gastro-entérites infantiles. Depuis 30 ans, la modélisation informatique, qui simule des phénomènes décrits par des théories, connaît un grand essor pour deux raisons : d'une part, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et de leur capacité de stockage et, d'autre part, l'augmentation des données liées aux progrès techniques.

De plus en plus précises, les méthodes de résolution numérique des équations aux dérivées partielles, qui régissent notamment la mécanique des fluides, éclairent des champs aussi variés que la physique des plasmas, l'étude du climat ou celle du comportement des colonies bactériennes. En astrophysique, grâce aux données collectées par les radiotélescopes et les sondes, on commence

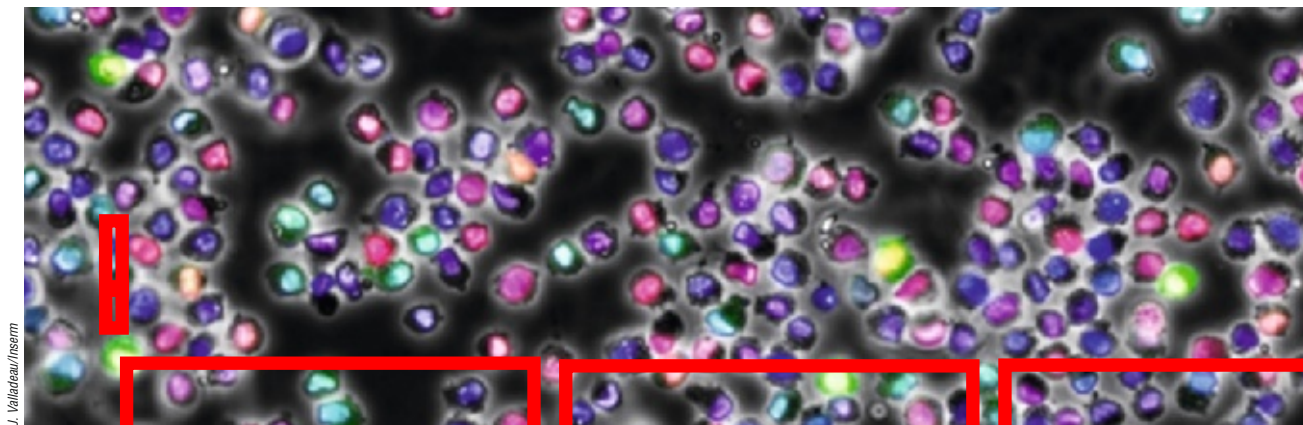
à produire des simulations plausibles de l'apparition et de l'évolution des galaxies. En climatologie, la puissance des calculateurs permet d'améliorer l'échantillonnage de la surface terrestre et, par conséquent, la fiabilité des prévisions.

En biologie, les données disponibles pour la modélisation sont impressionnantes. Les techniques de séquençage sont un million de fois plus performantes qu'il y a 20 ans : aujourd'hui, on séquence le génome de cellules saines et cancéreuses chez un même patient, ou de bactéries de diverses provenances. Avec ces millions de données et des modèles appropriés, on espère prévoir l'évolution d'un cancer ou mieux comprendre le fonctionnement d'une bactérie.

La transcriptomique et la protéomique, qui étudient l'expression des gènes en recensant leurs ARN messagers et leurs produits, fournissent aussi une quantité de données moléculaires que l'on peut intégrer dans des modèles ; grâce à la puissance actuelle des calculateurs, on simule par exemple

l'évolution de réseaux d'interactions moléculaires comportant jusqu'à 20 ou 30 composants.

Toutefois, les concepts progressent moins vite que la technologie. Accumuler d'innombrables données ne servira à rien si l'on ne conduit pas une réflexion approfondie sur la façon de les exploiter. Un modèle ne reproduit pas exactement la réalité : on fait des hypothèses, des choix pour la simplifier. Dans la montagne de données amassées, quels choix seront pertinents pour aborder le problème ? Par exemple, d'ici trois ou quatre ans, on sera sans doute en mesure de donner la carte d'identité des tumeurs de centaines d'individus et d'y repérer les mutations par rapport aux cellules saines. Mais parmi elles, quelles mutations conserver dans un modèle destiné à prévoir l'évolution d'un cancer ou à élaborer des tests de prédisposition ? Un modèle n'est pas une fin en soi. Il répond à une question, et tout l'enjeu des prochaines années sera de formuler les bonnes questions.



J. Valladau/Inserm

L'ÉPIGÉNÉTIQUE. L'une des nombreuses découvertes faites en biologie depuis les années 1990 est celle des mécanismes héréditaires par lesquels l'environnement des gènes agit sur leur expression. Les mécanismes, dits épigénétiques, peuvent être étudiés en comparant les variations de l'expression des gènes dans des cellules normales et malades, par exemple. Ici, des chercheurs de l'INSERM ont marqué deux gènes, *pp65* (en rouge) et *gfp* (en vert), pour observer leur expression dans les cellules d'un cancer du sein (dont le noyau apparaît en bleu lorsque ces gènes ne s'expriment pas).

Cette expression dépend de l'organisation de la molécule d'ADN et des conditions physico-chimiques qui règnent dans la cellule, mais aussi de facteurs plus indirects, présents dans l'environnement de l'individu. Ainsi, les modifications épigénétiques produites sous l'influence de l'âge ou de l'alimentation seraient responsables d'une expression anormale de certains gènes, et seraient la

cause de diverses maladies. Qui plus est, certaines modifications épigénétiques acquises sont transmissibles à la descendance.

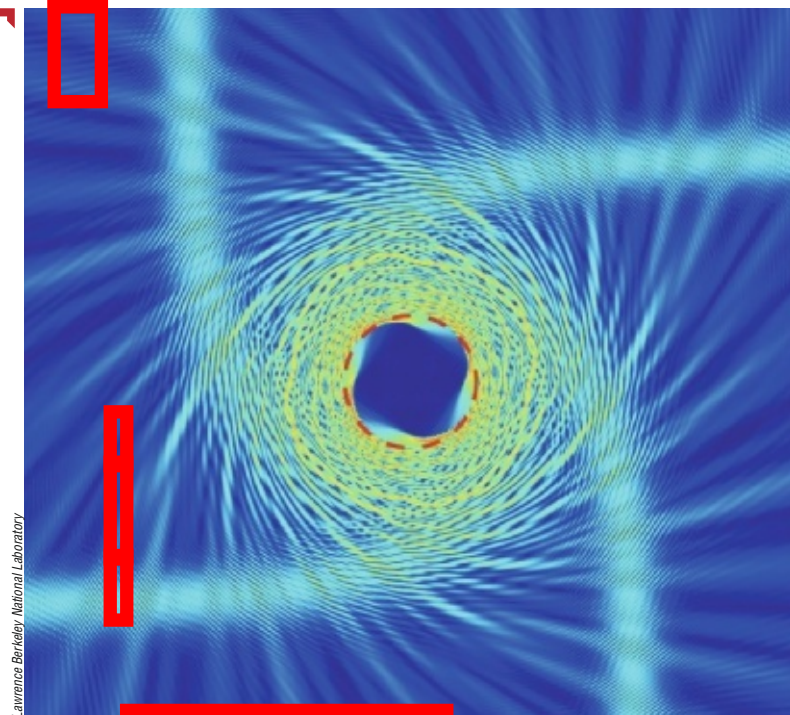
En quoi consistent ces mécanismes ? Tous influent sur l'expression des gènes sans changer leur séquence (la succession de leurs bases d'ADN). Ils sont de plusieurs types, entre autres : ajout de groupes méthyle sur l'ADN ; l'addition de groupes acétyle et méthyle sur les histones, protéines associées à l'ADN ; et l'interférence avec les ARN messagers, les molécules codées par les gènes, par le biais de micro-ARN et de grands ARN non codants.

Pourquoi ces modifications épigénétiques sont-elles importantes ? Les cellules se divisent, et les cellules filles doivent disposer d'informations indiquant quels gènes doivent s'exprimer ou rester silencieux (une cellule de foie n'exprimant pas les mêmes gènes qu'une cellule de muscle). Ces informations leur sont livrées par la cellule mère sous forme d'un profil épigénétique particu-

lier, c'est-à-dire d'un ensemble de modifications chimiques qui stabilisent l'activité de certains gènes et l'inactivent d'autres : selon les groupes chimiques qui se greffent sur l'ADN et les histones, certains gènes restent inaccessibles aux protéines qui déclenchent leur lecture, ou transcription, tandis que d'autres peuvent, au contraire, être atteints et transcrits en ARN messagers.

Les combinaisons spécifiques de modifications chimiques survenant sur les histones constitueraient un « code histone » qui permettrait à la cellule d'interpréter le génome. Bien que l'on ignore comment le code histone serait décodé, des scientifiques tentent de cataloguer, chez diverses espèces, à différents stades de développement, toutes les modifications épigénétiques identifiables dans un type donné de cellules.

Ce catalogue devrait permettre de mieux comprendre les dérèglements de l'expression des gènes propres à une maladie ou au cancer, la régulation du développement de l'embryon.



Lawrence Berkeley National Laboratory

LES MÉTAMATÉRIAUX. Ces quatre faisceaux lumineux (en bleu clair) dévient en s'approchant d'une structure centrale, comme attirés par elle ; une partie de l'énergie incidente s'échappe, mais une autre reste piégée, comme par un trou noir. Dans cette simulation réalisée en 2009 par Xiang Zhang et ses collègues, à Berkeley, la structure centrale est censée être une boule d'arséniure de gallium (GaAs) de quelques micromètres, où de minuscules poches d'air sont agencées de telle façon que l'indice de réfraction optique varie spatialement selon une loi précise. Des métamatériaux – matériaux structurés artificiellement à une échelle assez petite par rapport aux longueurs d'onde que l'on souhaite contrôler – peuvent ainsi reproduire la capture de la lumière par les trous noirs ou d'autres trajectoires célestes relevant de la théorie de la relativité générale.

Depuis cinq ou six ans, les métamatériaux constituent un domaine de recherche très actif, notamment grâce aux idées du théoricien britannique John Pendry. Ce physicien a ouvert la voie aux travaux sur les « caques d'invisibilité », qui dévient les ondes de façon à camoufler un objet grand par rapport à la longueur d'onde, ou sur des dispositifs optiques tels que des lentilles planes et parfaites. Autres exemples d'applications visées : des antennes unidirectionnelles, des composants pour l'optoélectronique ou, à l'inverse, bien différente, des brise-lames.

L'évolution par fusion

Marc-André Selosse

NASA/USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch

Fille du géant Typhon et de la déesse serpente Echidna, Chimère est une créature mythologique qui associe une tête de lion, un corps de chèvre et une queue de serpent. Cette créature est assurément mythique : aucun être vivant ne saurait combiner plusieurs espèces. Et pourtant... Dans la nature, il arrive que des matériels génétiques différents fusionnent : issus d'espèces différentes, beaucoup d'organismes vivants sont des chimères.

Cette conception semble en désaccord avec la représentation que beaucoup de biologistes se font de l'origine des espèces, c'est-à-dire de la spéciation. Dans son ouvrage publié en 1859, Charles Darwin propose que les espèces apparaissent par divergence à partir d'un ancêtre commun ; selon la théorie néodarwinienne de l'évolution, développée au XX^e siècle avec l'étude de la transmission des gènes dans les populations, cette divergence procède

de mutations nouvelles en eux-mêmes, mais c'est leur contribution à l'évolution que nous soulignerons ici, en nous appuyant notamment sur les résultats récents de l'étude des génomes. Ces dernières années, les généticiens ont par exemple découvert que la plupart des plantes à fleurs sont apparues à la suite de croisements entre espèces, ce qui prouve que l'hybridation est une source importante de diversité biologique. De même, on se rend compte aujourd'hui que les transferts de gènes entre espèces sont plus fréquents qu'on ne le croyait. Hybridation et transferts de gènes peuvent apparaître des lignées et des espèces nouvelles.

Après avoir rapidement rappelé comment l'évolution par fusion a été découverte, nous examinerons ses trois principales modalités : la fusion par endosymbiose, l'hybridation et les transferts de gènes. Nous proposerons alors une

L'arbre de l'évolution porte des branches qui se ramifient au fil du temps. Mais pas seulement : par un mécanisme dit d'évolution par fusion, certaines branches fusionnent parfois avant de diverger à nouveau.

par accumulation de mutations génétiques. C'est pour quoi les livres de biologie présentent le plus souvent l'histoire du vivant sous forme d'arbres ramifiés, dits phylogénétiques, où des nœuds représentent des espèces ancestrales qui ont divergé en deux rameaux (voire davantage), portant chacun les espèces qui en sont issues.

Cette vision rend compte de nombreux cas de spéciation, mais elle omet le rôle de phénomènes qui impliquent la fusion de matériels génétiques provenant d'espèces différentes : à l'image des cours d'eau dont les bras fusionnent pour former un réseau fluvial (voir la figure 1).

Les mécanismes d'acquisition du matériel génétique d'une espèce par une autre

conception synthétique de l'origine des espèces en tenant compte de ces mécanismes d'évolution par fusion.

L'idée d'une évolution par fusion a été envisagée dès la fin du XIX^e siècle. En 1882, le botaniste allemand Andreas Schimper s'interroge sur les organites cellulaires des plantes contenant la chlorophylle, les plastides : « Peut-être une plante verte est-elle que l'union entre un organisme incolore et un microbe possédant des pigments chlorophylliens. » En 1905, le Russe Konstantin Mereschkovsky consacre un livre entier à la théorie de la « symbiogenèse », selon laquelle la fusion de deux organismes est le moteur de l'évolution. Faute de preuves, cette théorie tombe ensuite en désuétude.

Elle ne revient que sur le devant de la scène qu'en 1970 avec la biologiste américaine Lynn Margulis. Dans *L'origine des cellules eucaryotes* – les eucaryotes sont les organismes dont l'ADN est contenu dans un noyau –, elle affirme que certaines parties des cellules eucaryotes sont en fait des bactéries. Celles-ci vivraient en symbiose dans les cellules, c'est-à-dire en entretenant une relation réciproquement

1. UN RÉSEAU FLUVIAL, tel celui du delta du fleuve Lena, en Sibérie, illustre la façon dont les espèces évoluent : certaines espèces divergent, puis convergent par des mécanismes d'évolution par fusion, avant de diverger à nouveau. L'évolution des espèces ne serait pas qu'une suite de divergences à partir d'un ancêtre commun, mais une succession de divergences et de fusions.

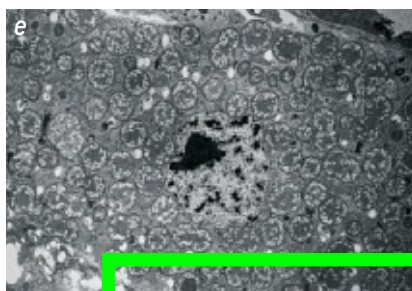
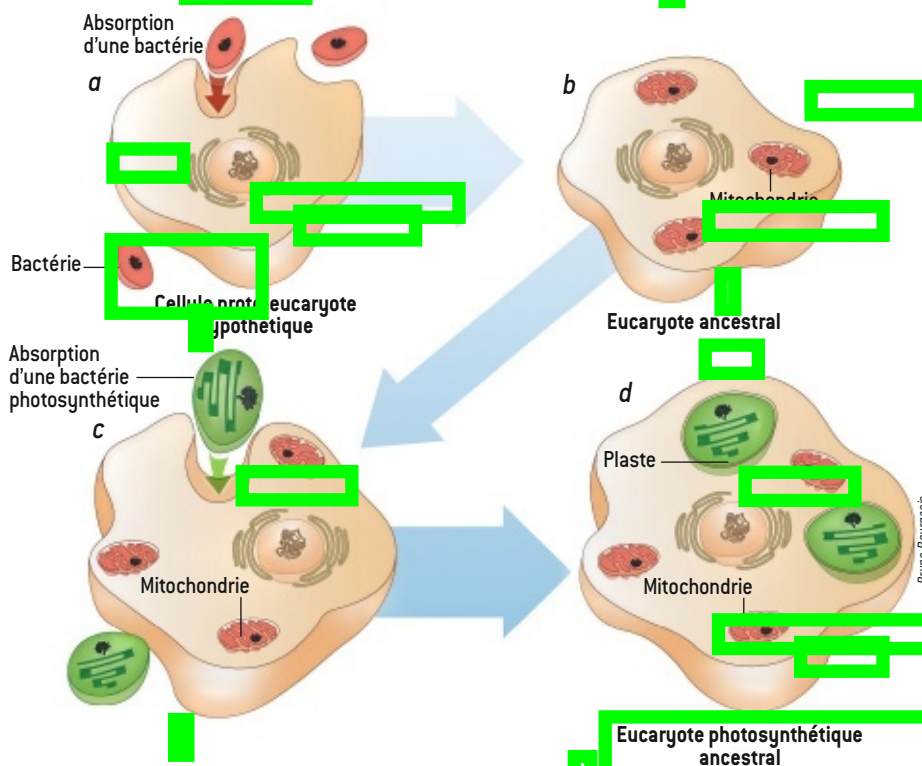
L'AUTEUR



Marc André SELOSSE, professeur de biologie à l'Université Montpellier II, est chercheur au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) du CNRS.

L'ESSENTIEL

- ✓ La théorie darwinienne classique illustre l'évolution des espèces par un arbre dans lequel les branches ne se rejoignent jamais.
- ✓ Or des phénomènes de fusion évolutive se produisent dans le monde du vivant.
- ✓ Les fusions évolutives sont de trois types : l'endosymbiose, l'hybridation et le transfert de gènes.
- ✓ Plus qu'un arbre qui se ramifie, l'évolution s'apparente à un réseau complexe de lignées échangeant des gènes.



2. DES CELLULES EUCARYOTES

ont un jour absorbé des bactéries (a) qui ont donné naissance aux mitochondries, donnant l'ancêtre des eucaryotes actuels (b). L'absorption de bactéries photosynthétiques (c) a produit l'ancêtre des végétaux actuels (d). Les endosymbiotes jouent un rôle dans le métabolisme des cellules. Par exemple, des bactéries *Buchnera* (e, les petits cercles)

fournissent à l'insecte des acides aminés.

bénéfiques avec leur hôte; elles seraient transmises de génération en génération. Cette théorie relative à la symbiose intracellulaire, dite endosymbiotique, est aujourd'hui largement acceptée.

Elle explique par exemple l'origine des mitochondries, les organites qui fournissent l'énergie nécessaire à la vie en assurant la respiration cellulaire: les mitochondries sont des bactéries qui à un moment de l'évolution se sont intégrées dans une cellule et y ont non seulement survécu, mais ont établi des liens avec la cellule colonisée (voir la figure 2). Tous les organismes eucaryotes, des végétaux aux animaux en passant par les champignons et divers unicellulaires, contiennent des mitochondries. Le petit génome contenu dans ces organites est proche de celui de bactéries parasitant les cellules, par exemple *Rickettsia*, l'agent du typhus.

Ainsi, les mitochondries sont des bactéries endosymbiotiques qui sont devenues

des organites intracellulaires utilisant l'oxygène pour produire de l'énergie. Même dans des milieux dépourvus d'oxygène, certains eucaryotes qui ne respirent pas contiennent encore des mitochondries modifiées participant au métabolisme, c'est-à-dire produisant de l'énergie ou assurant la synthèse de molécules indispensables aux cellules.

Les eucaryotes actuels descendent donc d'une cellule ancestrale formée d'une cellule hôte et d'une protomitochondrie, qui a ensuite évolué différemment selon les lignées. De même, l'analyse du génome des plantes qui assurent la photosynthèse dans les plantes et les algues, ceux-là même qu'avait étudiés Schimper il y a 150 ans, a

confirmé que les plastides résultent de symbioses qui se sont produites plusieurs fois dans l'évolution. Dans les plantes vertes ou les algues vertes et rouges, par exemple, ils dérivent de bactéries photosynthétiques du groupe des cyanobactéries.

Il existe beaucoup d'autres exemples d'endosymbioses plus récentes: les cellules de nombreux eucaryotes contiennent des bactéries, parfois de plusieurs espèces, qui sont transmises lors des divisions cellulaires. C'est le cas pour la majorité des protozoaires et des insectes (voir la figure 2). Comme les mitochondries, ces endosymbioses assurent souvent des fonctions importantes, qui ont été sélectionnées au cours de l'évolution.

Par exemple, l'équipe de Nancy Moran, de l'Université d'Arizona, a montré que des bactéries facilitent la colonisation de certaines niches écologiques par des insectes en leur apportant des éléments nutritifs indispensables. La cicadelle *Homalodisca coagulata* se nourrit de sève dépourvue d'une certaine quantité d'acides aminés essentiels aux insectes: elle contient deux bactéries, *Sulcia* et *Wigglesworthia* qui synthétisent huit de ces acides aminés, et *Baumannia cicadellinicola*, qui en produit deux autres. De même, la mouche tsé-tsé (*Glossina palpalis*) survit grâce à la bactérie *Wigglesworthia glossinidia*, qui synthétise une vitamine B absente du sang dont elle se nourrit. Citons enfin les pucerons qui parasitent le trèfle et deviennent incapables de se nourrir de cette plante quand on élimine expérimentalement leurs bactéries endosymbiotiques.

Les bactéries endosymbiotiques des insectes ont des génomes très réduits. Elles ont perdu les gènes nécessaires à une vie autonome: seuls persistent donc les chimères issues de la fusion de la bactérie et de l'insecte. Ces fusions endosymbiotiques ont contribué à l'extraordinaire diversification des insectes, dans des niches écologiques très diverses.

Outre la fusion de génomes d'origines différentes par endosymbiose, un autre mécanisme de l'évolution par fusion est l'hybridation, qui croise deux espèces. Ce processus repose sur la fusion de cellules sexuelles et donc de matériels génétiques issus de deux espèces différentes. Contrairement à une idée reçue, elle n'est pas propre aux végétaux, mais elle est également à l'œuvre chez les micro-organismes et les animaux.

Dans le monde végétal, l'hybridation revêt deux formes: la première, la

cendant hérite d'un demi-génome de chaque espèce parentale; au sens large, il s'agit d'une allopolyploïdie, où le descendant cumule un génome complet de chaque parent, ce qui le doterait d'un génome multiple (*polu*) d'origines différentes (*allo*).

Les nouvelles espèces hybrides

L'exemple des séneçons, des petites marguerites jaunes, illustre la diversité des mécanismes évolutifs de l'hybridation (voir l'encadré ci-dessous). Le séneçon négligé (*Senecio squalidus*) est un hybride de deux espèces vivant dans des zones différentes de l'Europe. Les deux espèces parentales ont chacune deux lots de dix chromosomes, et le séneçon négligé comporte un lot de chaque. Introduit en

Grande-Bretagne, il y est entré en contact avec le séneçon commun (*Senecio vulgaris*), qui a deux lots de 20 chromosomes.

L'hybridation avec ce dernier paraissait *a priori* vouée à l'échec : un hybride simple qui comprendrait dix chromosomes d'un parent et 20 chromosomes de l'autre serait stérile. En effet, lors de la formation du pollen et des ovules, un processus de division cellulaire, la méiose, divise en deux le nombre de chromosomes dans les cellules sexuelles. Il commence par associer les chromosomes par paires, ce qui est impossible quand les espèces parentales n'ont pas le même nombre de chromosomes.

Pourtant, il existe en Grande-Bretagne un hybride particulier, *Senecio cambrensis*. Il est doté d'un double génome, soit deux lots de 30 chromosomes : deux lots de 10 chromosomes du séneçon

✓ BIBLIOGRAPHIE

P.S. Soltis et D.E. Soltis, The role of hybridization in plant speciation, *Ann. Rev. Plant Biol.*, vol. 60, pp. 61-88, 2009.

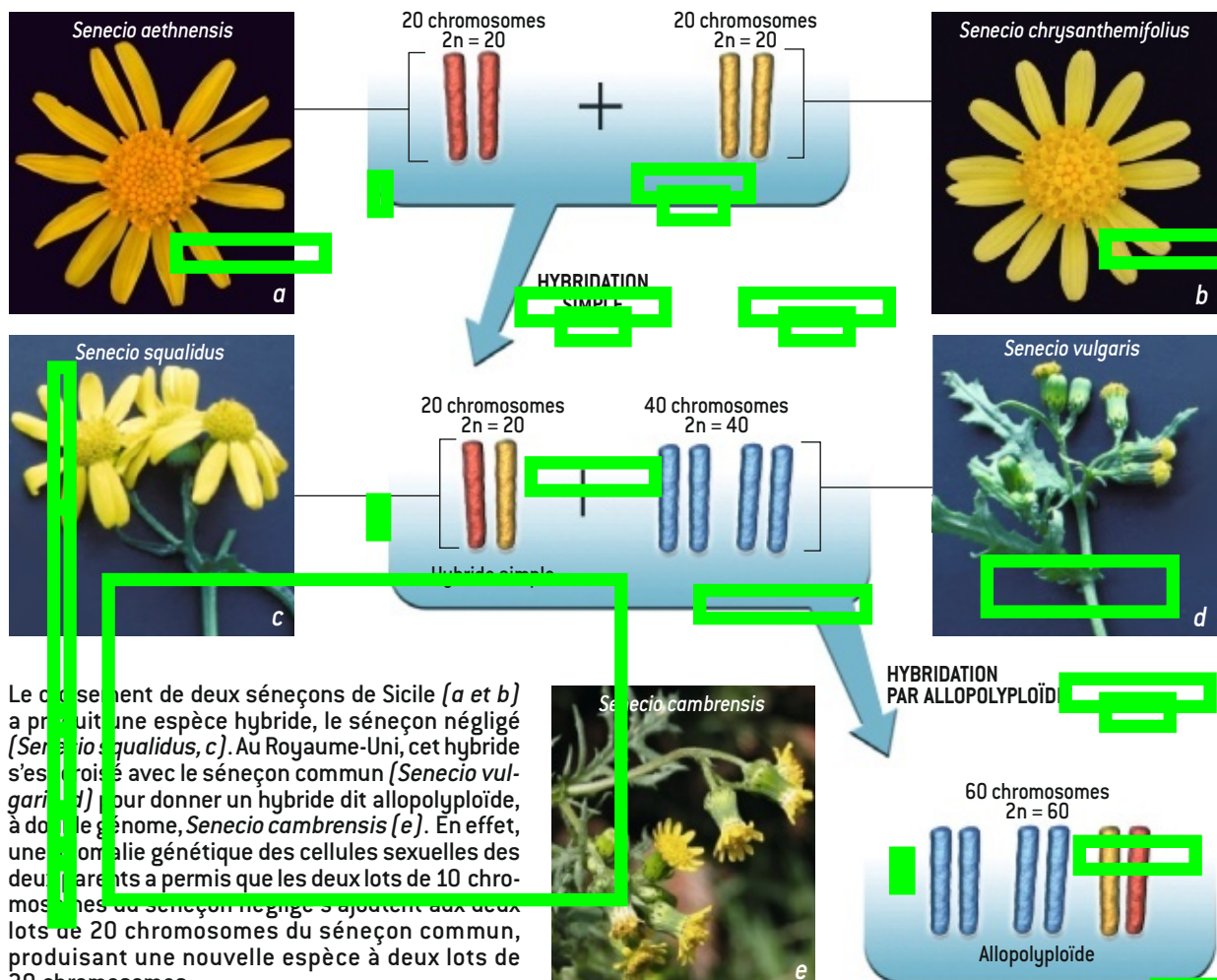
P.J. Keeling, Functional and ecological aspects of horizontal gene transfer in eukaryotes, *Curr. Opin. Genet. Dev.*, vol. 19, pp. 613-619, 2009.

P.-H. Gouyon (ss la dir.), Aux origines du sexe, Fayard, 2009.

A.B. Simonsen et al., Rebuilding the genome tree of life, *PNAS*, vol. 102, Suppl. 1, pp. 6608-6613, 2005.

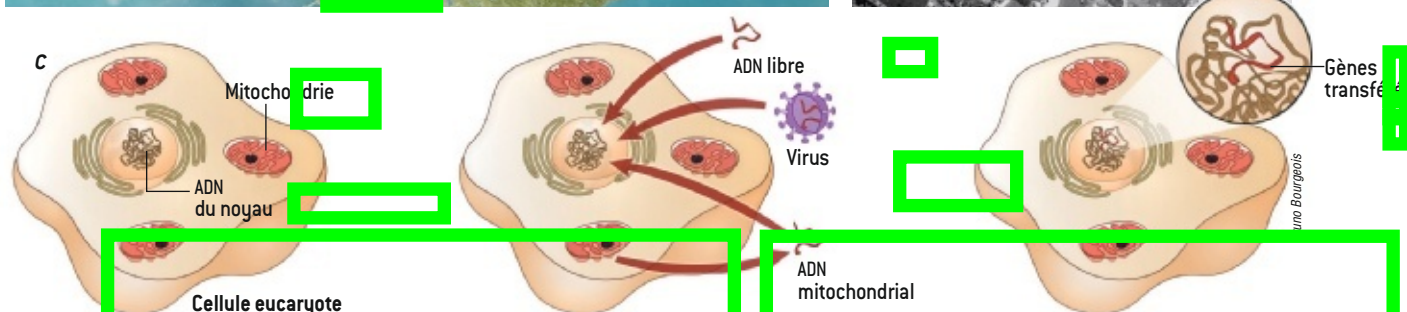
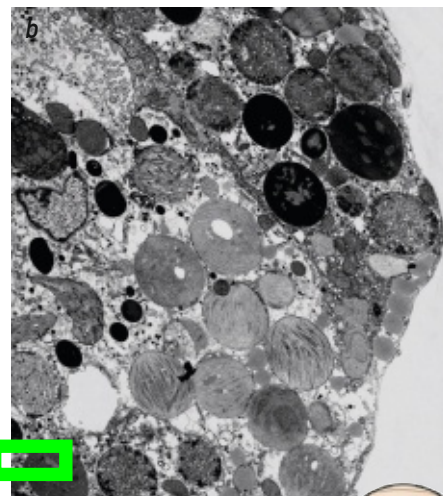
M.-A. Selosse, La symbiose, Vuibert, 2000.

LA FUSION PAR HYBRIDATION



Le croisement de deux séneçons de Sicile (a et b) a produit une espèce hybride, le séneçon négligé (*Senecio squalidus*, c). Au Royaume-Uni, cet hybride s'est croisé avec le séneçon commun (*Senecio vulgaris*, d) pour donner un hybride dit allopolyploïde, à double génome, *Senecio cambrensis* (e). En effet, une anomalie génétique des cellules sexuelles des deux parents a permis que les deux lots de 10 chromosomes du séneçon négligé s'ajoutent aux deux lots de 20 chromosomes du séneçon commun, produisant une nouvelle espèce à deux lots de 30 chromosomes.

Bruno Bourgeois



3. CE GAS ÉROPODE SANS COQUILLE, *Elysia clarki* (a), se convertit en végétal photosynthétique temporaire en conservant dans ses cellules les plastides issus de l'algue verte *Penicillus capitatus*, qu'il est ici en train de manger. Les plastides pièges (b, *grossis mille fois*) continuent à fonctionner pendant plusieurs mois au bénéfice du gaspéropode,

car son génome a acquis des gènes de l'algue nécessaires à l'entretien des plastides. Les transferts de gènes chez les eucaryotes (c) peuvent se produire par absorption d'ADN libre, par transfert d'ADN issus des organites (ici, la mitochondrie) ou par l'ADN porté par un virus : dans tous les cas, le noyau acquiert de nouveaux gènes (en rouge sur l'agrandissement).

négligé et deux lots de 20 chromosomes du sénéçon commun. *Senecio cambrensis* est un allopolyploïde, à reproduction sexuée. Il est sans doute apparu par croisement entre un grain de pollen et un ovule de chaque espèce parentale, dont la méiose n'a pas eu lieu normalement.

C'est un exemple de fusion récent à l'échelle de l'évolution, et local. Mais ce type de mécanisme a un impact réel sur l'évolution à long terme. Le séquençage du génome de divers organismes eucaryotes a révélé que certaines parties se ressemblent. Elles seraient les vestiges de l'apport de lots de chromosomes semblables qui auraient ensuite évolué indépendamment.

Ainsi, l'étude des plantes à fleurs, ou angiospermes, montre que le génome de leur ancêtre commun, qui poussait il y a 150 millions d'années, résulte d'au moins trois fusions de génomes. Plus d'une vingtaine d'autres fusions ont eu lieu par la suite au cours de la diversification des lignées d'angiospermes. Cela explique les nombres parfois élevés de chromosomes

des plantes à fleurs (jusqu'à plusieurs centaines). Bien qu'on ne puisse le démontrer, ces observations laissent penser que les allopolyploïdes peuvent fonder des lignées durables.

Une évolution par déspéciation

Par ailleurs, on constate que de telles espèces hybrides se croisent parfois avec les espèces qui leur ont donné naissance. Elles peuvent alors fusionner en une unique espèce hybride. Le canard colvert (*Anas platyrhynchos*), introduit dans diverses régions de la planète, en est un exemple. Il s'est croisé avec des canards locaux : le canard à sourcils (*Anas superciliosa*) en Australie, le canard des îles Hawaï (*Anas wyvilliana*), le canard brun (*Anas fulvigula*) en Floride... Les hybrides qui en ont résulté se croisent aujourd'hui avec les espèces parentales locales, qu'elles menacent de supplanter. On parle alors de « déspéciation », puisque le processus peut entraîner à terme la disparition de deux

espèces parentales au profit d'une nouvelle espèce hybride.

S'ils forment rarement des espèces allopolyploïdes, on estime que dix pour cent des animaux peuvent s'hybrider avec une autre espèce (25 pour cent chez les plantes). L'hybridation et la déspéciation jouent aussi dans le monde bactérien, comme Samuel Sheppard, de l'Université d'Oxford, l'a mis en évidence entre *Campylobacter jejuni* et *Campylobacter coli*, deux bactéries intestinales issues d'un ancêtre commun datant d'environ 100 millions d'années. Diverses souches de la première ont acquis, à plusieurs reprises, de l'ADN issu de la seconde. Les circonstances de ces échanges restent inconnues, car *Campylobacter jejuni* vit dans le tube digestif du bétail, alors que *Campylobacter coli* vit dans celui d'oiseaux sauvages. Des changements récents dans les pratiques agricoles ont pu favoriser un rapprochement et la fusion des deux espèces.

Ces fusions par hybridation ne font intervenir que des espèces parentales voisines dans l'évolution. Mais une autre

forme d'évolution par fusion assemble des gènes d'origines très différentes : le transfert de gènes. On sait que des transferts de gènes se produisent dans les bactéries de trois façons différentes. Ou bien les gènes circulent d'une bactérie à l'autre par des ponts cellulaires : c'est la conjugaison. Ou bien un virus infecte la bactérie et y introduit des gènes : c'est la transduction. Enfin, il peut exister dans l'environnement, des fragments d'ADN libre qu'une bactérie peut acquérir : c'est la transformation. Souvent, les gènes transférés sont repérables car on les trouve dans des lignées éloignées, mais pas dans les lignées proches.

Transferts de gènes à double sens

Ainsi, si l'on compare les génomes du colibacille (*Escherichia coli*) et de la lignée voisine des *Salmonella*, avec laquelle il partage un ancêtre commun datant de 100 millions d'années, on constate que près de 750 gènes issus d'espèces plus éloignées ont été acquis par le colibacille, soit 18 pour cent de son génome actuel.

Les transferts peuvent se produire entre organismes très éloignés dans l'arbre évolutif. Les bactéries *Chlamydia*, parasites des animaux et des plantes, ont acquis des gènes d'eucaryotes permettant la synthèse des stéroïdes, des lipides tel le cholestérol, que les bactéries ne produisent normalement pas. Pour qu'un transfert de gènes se produise, il suffit que les partenaires coexistent dans un même milieu, quel que soit leur degré de parenté. Ainsi, les fusions par transfert de gènes sont fréquentes chez les bactéries.

On a récemment découvert, grâce au séquençage des génomes de plusieurs eucaryotes, que ces organismes subissent aussi de tels transferts de gènes. Ainsi, les vers nematodes parasites des plantes, tels *Meloidogyne hapla* et *Meloidogyne incognita*, ont acquis des gènes d'enzymes bactériennes détruisant la paroi végétale, ce qui leur permet d'attaquer les plantes. De même le champignon *Pyrenophora tritici-repentis* est devenu un parasite du blé dans les années 1940 : cette espèce, initialement bénigne, a alors reçu d'un autre champignon parasite du blé un gène codant une toxine affaiblissant l'hôte. À l'évidence, ces transferts de gènes sont au cœur de l'adaptation des organismes à leurs niches écologiques.

Plus surprenant encore, des gastéropodes marins, les Élysides, absorbent des plastides d'algues et les intègrent pour quelque temps dans leurs propres cellules (voir la figure 3). Les plastides fonctionnent alors au bénéfice de l'animal, qui utilise les sucres formés. *Elysia chlorotica* consomme par exemple une algue annuelle éphémère, dont elle conserve les plastides pendant... dix mois. Or le plastide porte un génome si réduit que la plupart de ses protéines sont produites à partir des gènes du noyau de l'algue. Le noyau des Élysides a acquis certains de ces gènes, comme ceux des protéines synthétisant la chlorophylle. Ces chimères sont les seuls animaux à fabriquer de la chlorophylle : elles se transforment en végétaux « transitoires » entre deux prises alimentaires.

Contrairement aux processus à l'œuvre chez les bactéries, les mécanismes des transferts de gènes chez les eucaryotes restent mal compris. Il s'agit vraisemblablement d'événements accidentels. L'incorporation d'ADN issu de la digestion d'aliments est sans doute fréquente chez les unicellulaires, telles les amibes, qui se nourrissent en digérant d'autres cellules. Les virus, quand ils changent d'espèce hôte, sont aussi de possibles vecteurs de gènes.

En revanche, les transferts sont peu fréquents chez les animaux, car les cellules sexuelles seules à transmettre les gènes, sont à l'abri de l'environnement et ne reçoivent quasiment pas de gènes. Seuls certains virus sont capables de les atteindre, et d'y introduire leur génome : les rétrovirus humains représentent près de dix pour cent des gènes de l'homme.

Des chimères au cœur des cellules

Par ailleurs, on sait que de nombreux gènes issus de plastides et de mitochondries se sont intégrés dans le génome du noyau cellulaire des eucaryotes. Là, ils permettent non seulement la synthèse de protéines intervenant dans les plastides ou les mitochondries, mais aussi de protéines ayant de nouvelles fonctions dans la cellule.

Par exemple, 2000 des 25000 gènes de l'arabes des dames (*Arabidopsis thaliana*), une plante proche de la moutarde servant de modèle aux biologistes, seraient issus de ses plastides. Ainsi en est-il des gènes codant les phytochromes, protéines sensibles à la lumière qui régulent le développement de

Glossaire

✓ FUSION

Terme proposé pour réunir l'ensemble des mécanismes évolutifs qui regroupent dans une même lignée des gènes issus de lignées différentes : endosymbiose, hybridation et transfert de gènes.

✓ ENDOSYMBIOSE

Symbiose où l'un des partenaires vit dans les cellules de l'autre. Si elle peut être transmise à la génération suivante, c'est une fusion évolutive.

✓ HYBRIDATION

Résultat de la fécondation entre gamètes issus de lignées différentes. L'hybride formé peut être viable ou non. S'il est fertile, il peut constituer une espèce nouvelle.

✓ ALLOPOLYPOÏDIE

Hybridation où l'organisme contient non pas un jeu de chromosomes de chaque parent, mais deux. Les organismes qui en sont issus constituent une espèce nouvelle, car ils ne se croisent plus avec l'espèce des parents.

✓ TRANSFERT DE GÈNE

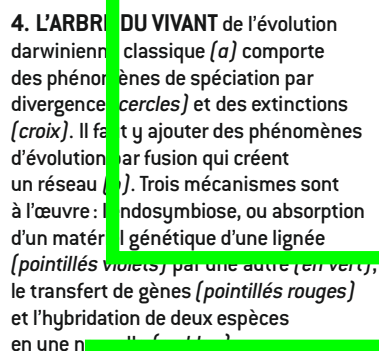
Passage d'un gène d'un organisme à un autre d'espèces différentes. Mécanisme fréquent chez les bactéries, il existe aussi chez les organismes plus complexes.

✓ SUR LE WEB

<http://sbe.gomaine.edu/cumbio/index.html>

<http://www.sch.rosscoff.fr/ETSymbioses2008>

http://www.cefe.cnrs.fr/cnev/MA_Selosse.htm



Ainsi, les processus de fusion contribuent à l'évolution des espèces,

Plus qu'un arbre, le cours de l'évolution se fait un réseau, dont les branches se séparent, puis refusionnent (*voir la figure 1*). Darwin avait puisé son inspiration dans les arbres généalogiques ; or, si on les regarde de près, ce sont aussi des réseaux. Chaque naissance unit deux lignées à travers leur descendance. Certains chercheurs tentent de dessiner les

En 1970, L. Margulis écrivait que le travail de Darwin était « anthropomorphique et d'un intérêt limité », critiquant ainsi l'absence de l'endosymbiose dans la vision darwinienne de l'évolution. Souvent, les approches néodarwiniennes prennent trop peu en compte l'importance des fusions. En réalité, l'évolution par fusion et l'évolution par divergence ne s'excluent pas : chacune est un mécanisme d'innovation biologique, créant une diversité sur laquelle agit la sélection naturelle. En ce sens, les arbres évolutifs « classiques » restent valables, mais ne reflètent qu'une partie de la réalité. La conception de l'évolution biologique vers laquelle nous pensons qu'il faudrait tendre enrichit le schéma classique de l'évolution par les phénomènes de fusion évolutive. Loin de se figer en un dogme, la théorie néodarwinienne de l'évolution continue d'évoluer.

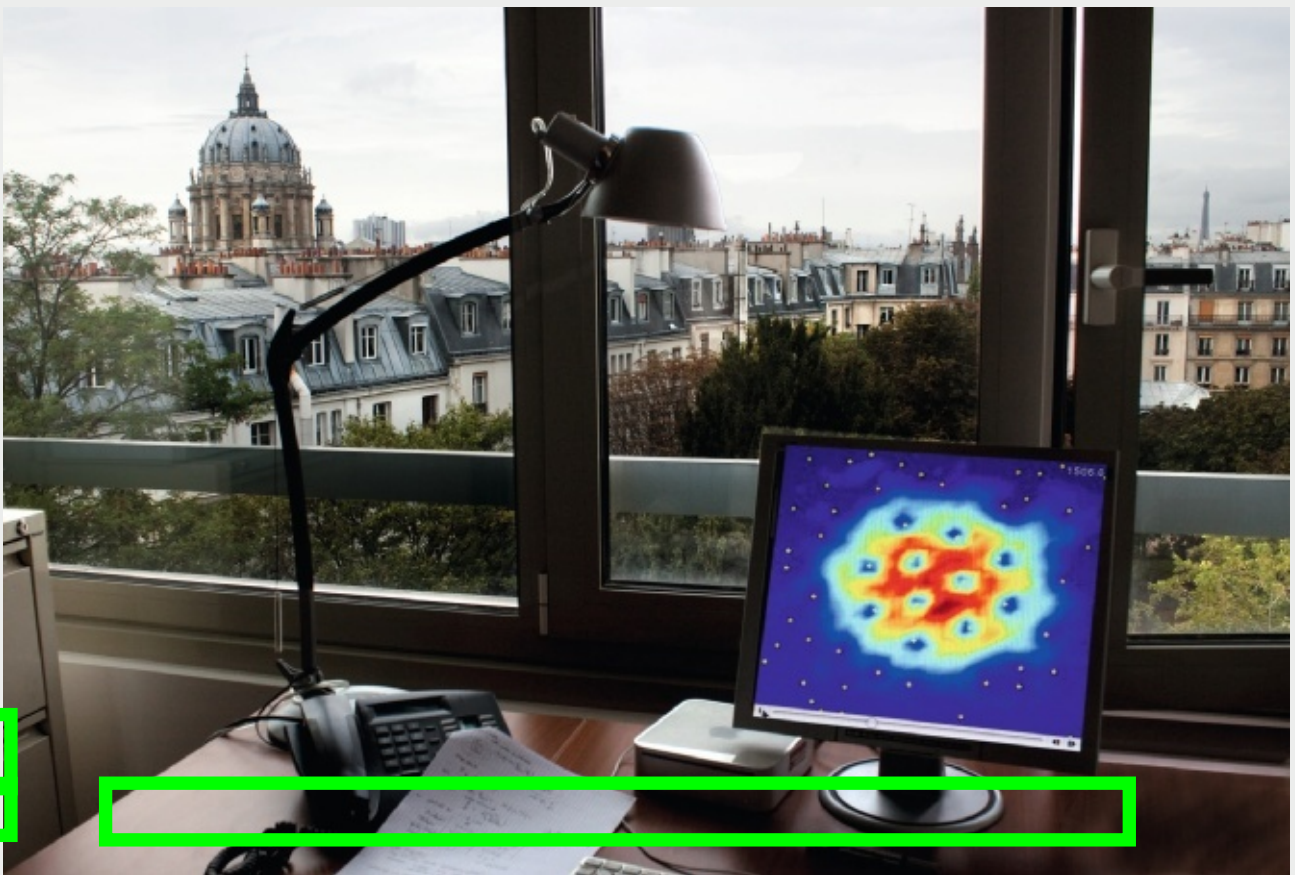


Institut Francilien
de Recherche
sur les Atomes Froids

L'exploration des richesses du monde quantique

« Par la mise en réseau de ses équipes de recherche, l'IFRAF contribue à enrichir la vision moderne du monde quantique et à mieux maîtriser les technologies du temps et de l'espace »

Michèle Leduc, directrice de l'IFRAF



Les petits nuages d'atomes ultrafroids en tournant sur eux-mêmes engendrent des tourbillons quantiques qui inspirent les théoriciens de l'IFRAF.

La physique quantique a élargi notre vision du monde et suscité de multiples découvertes qui, du transistor au laser, ont bouleversé notre vie; au XXI^e siècle, cette exploration s'amplifiera et contribuera de façon majeure à notre environnement technique. La physique des atomes froids est une magnifique réussite qui estompes les barrières entre physique fondamentale et physique appliquée, les nouvelles propriétés découvertes offrant une perspective pour des outils prometteurs. Cette recherche où les propriétés quantiques de la matière sont exacerbées, est le prolongement vivace et fructueux d'une longue tradition de physique atomique de haut niveau en France; elle a été personnalisée, entre autres, par les prix Nobel d'Alfred Kastler en 1966 et de Claude Cohen-Tannoudji en 1997.

Indépendance de la pensée et mise en commun des idées

Alfred Kastler, avec Jean Brossel, a été le pionnier des recherches sur les inversions de populations des atomes qui ont permis le laser. Claude Cohen-Tannoudji et ses collègues du laboratoire Kastler-Brossel ont travaillé sur la théorie du ralentissement, du refroidissement et du piégeage des atomes par la lumière.

Pendant longtemps les propriétés quantiques n'ont pu être observées que sur des moyennes; les conséquences des lois régissant les électrons et les photons portaient sur des comportements d'ensembles gigantesques de particules (de l'ordre du nombre d'Avogadro, 10^{24}). C'était le domaine de la physique du solide, des liquides superfluides, des cristaux supraconducteurs. Aujourd'hui le refroidissement et le piégeage des atomes permettent de mettre en évidence des propriétés quantiques sur des atomes isolés et de réaliser des expériences de pensées dont la réalisation était inenvisageable à l'époque d'Einstein. En outre, il devient possible d'observer des comportements collectifs prédits par la mécanique quantique pour de petits nuages dilués d'atomes, en particulier la condensation de Bose-Einstein.

Ces petits nuages de gaz, comportent moins d'un milliard d'atomes. Ils lévitent, sont confinés par la lumière laser et refroidis à des températures de quelques milliardièmes de degré au dessus du zéro absolu.

Le but de l'*Institut Francilien de Recherche sur les Atomes Froids*, lancé en 2006, est de fédérer les recherches sur cet état de la matière.

Réflexion individuelle et démarche collective

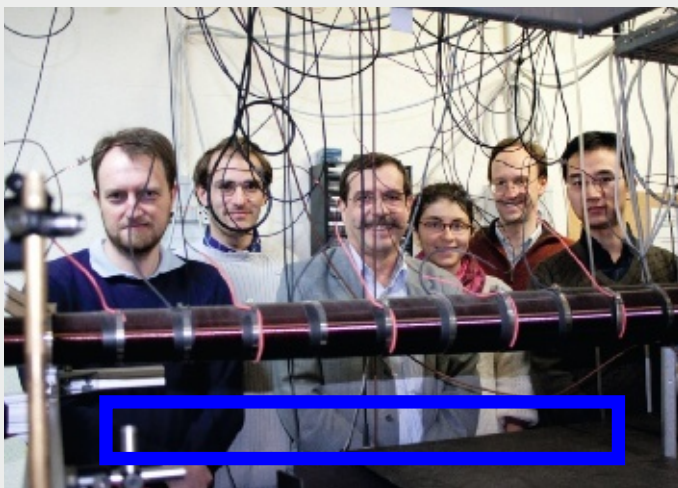
Donnons la parole aux acteurs de la recherche comme ils se sont exprimés dans le livre de Jean-François Dars et Anne Papillault, *Le plus grand des hasards, Surprises quantiques*, 2010, Éditions Belin.

« Les atomes froids, a dit Claude Cohen-Tannoudji, sont devenus des outils privilégiés pour la recherche. Ils permettent des tests très sévères des théories fondamentales, telles que la relativité générale, et ouvrent de nouveaux champs comme l'interférométrie atomique, les molécules ultra-froides, les gaz quantiques dégénérés. L'IFRAF contribuera de manière essentielle au développement de cette aventure scientifique. » Pour Williams Phillips, prix Nobel de Physique, « la meilleure façon d'apprendre est de travailler avec des gens de qualité... Certaines de mes meilleures occasions d'apprendre ont résulté de ma capacité à contaminer les autres par ma propre confusion, ou lors d'un violent désaccord avec mes collègues sur un point de physique: j'ai la conviction que lorsqu'il s'agit de physique, il y a une réponse ».

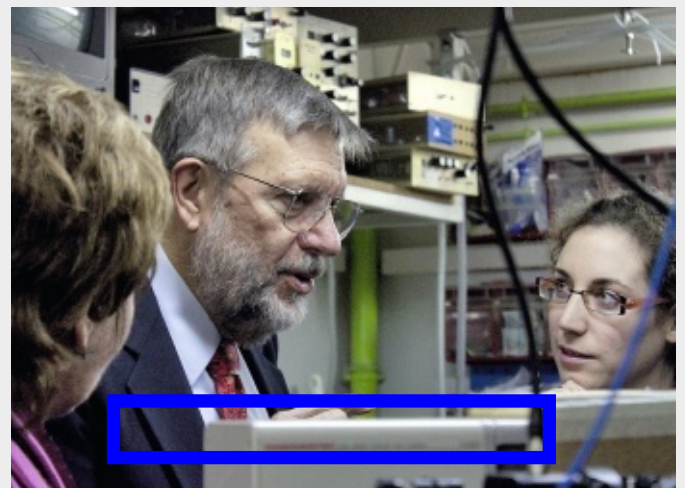
La physique quantique est dépeinte comme énigmatique et Antoine Georges témoigne de cette fascinante difficulté: « Comme tout serait facile si nous autres, physiciens quantiques, pouvions accéder à ce monde secret avec l'évidence de nos sens. Au lieu de cela, il nous faut construire des appareils sophistiqués, effectuer des calculs com-

“ Le critère incontournable de la valeur d'une théorie physique est la propriété étonnante de receler plus de richesses que ce qu'on y avait mis ”

Alain Aspect



Denis Boiron, Aurélien Perrin, Alain Aspect, Valentina Krachmalnicoff, Chris Westbrook, Hong Chang



William D. Phillips exprimant des idées et des doutes fertiles devant Juliette Simonet

pliqués, on tenter de deviner en presque aveugles ces secrets qui, pour la nature elle-même, vont de soi. »

Ce compagnonnage se prolonge dans les réalisations expérimentales qui confirment la réalité des surprises que l'esprit a quelques difficultés à entrevoir.

La visite de la Sainte Chapelle

« Ces surprises jubilatoires face à l'univers quantique se retrouvent lors de l'enseignement de cette discipline. La marche d'approche n'est certes pas des plus aisées : si l'apprentissage d'une théorie physique peut se comparer à la découverte d'un monument, celui de la mécanique quantique ressemble davantage à la visite de la Sainte Chapelle qu'à celle du château de Versailles. On ne découvre ses richesses qu'après avoir traversé des cours étroites et des salles basses. Mais une fois sur place, les élèves se piquent au jeu et rivalisent d'inventivité pour trouver de nouveaux tours, tentant de déterminer furtivement si la particule est à droite ou à gauche, voire de téléporter leurs camarades » remarque Jean Dalibard.

La physique expérimentale a ses réalités. Juliette Simonet a illustré cette tâche par le maniement de l'outil : « Aujourd'hui je suis en dernière année de thèse et je manie beaucoup la clé de 13 (par exemple pour changer une pompe).... L'expérimentation a un impact important sur la théorie, non seulement pour la vérifier mais aussi pour stimuler au laboratoire des problèmes non solubles numériquement. »

Pour quoi faire ?

La physique fondamentale crée ses propres instruments d'action. Écoutez Christian Bordé : « La mécanique quantique reste encore bien mystérieuse, mais elle envahit peu à peu notre échelle humaine grâce à cette métrologie quantique en plein développement. À un bout de la chaîne ces recherches sont enracinées dans l'héritage de De Broglie et d'Einstein. À l'autre, elles conduisent à de nouveaux outils pour l'exploration du monde et pas seulement sur terre car, à en juger par la multiplication des projets de missions spatiales qui les proposent, leur avenir est aussi dans l'espace. »

L'IFRAF est un réseau de 33 équipes de recherche toutes associées au CNRS et réparties sur différents établissements : l'École normale supérieure, l'Observatoire de Paris, l'Institut d'Optique et les universités UPMC Paris-Sud 11 et Paris-Nord 13. L'IFRAF a également associé des équipes situées dans d'autres établissements. Son siège est à l'École normale supérieure, 45 rue d'Ulm, 75 231, Paris, Cedex 05.

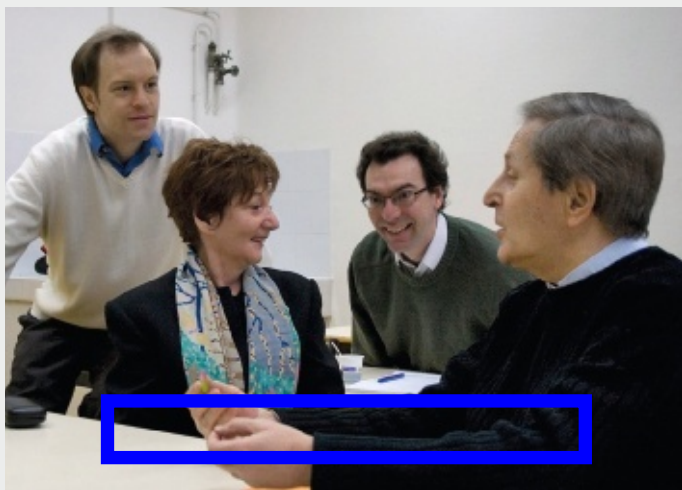
Contact : leduc@lkb.ens.fr.

Les recherches à l'IFRAF regroupent trois axes scientifiques :

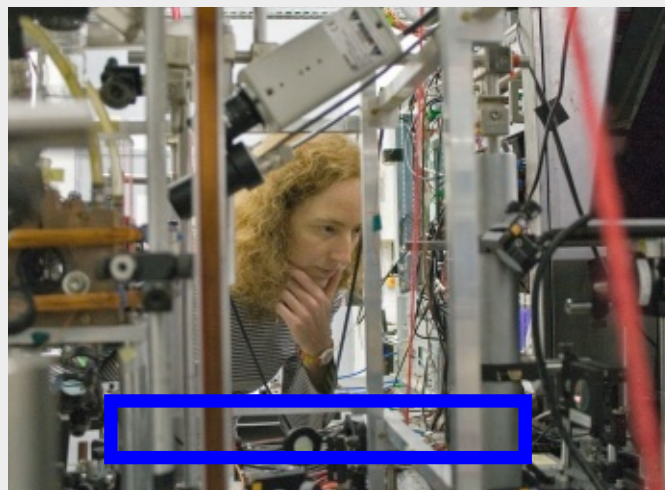
- Les gaz quantiques et les comportements collectifs dans les condensats de Bose-Einstein. Les atomes froids, bosons ou fermions, placés dans des potentiels optiques périodiques forment des systèmes modèles pour mieux comprendre la matière condensée. Ces études s'étendent aux molécules froides.
- La métrologie de précision. L'utilisation des atomes froids fait gagner plusieurs ordres de grandeur sur la précision des horloges, des gyromètres, des gravimètres et des capteurs inertiels pour le positionnement et la navigation. La miniaturisation sur des puces à atomes est en cours.
- L'information quantique. Les atomes froids isolés et piégés en petit nombre permettent d'envisager de nouveaux dispositifs fondés sur l'interaction entre particules (atome/atome ou atome /photon) destinés au stockage de l'information ou à la cryptographie quantique.

Dans les horloges atomiques « chefs-d'œuvre quantiques », le temps est mesuré comme l'inverse d'une fréquence, laquelle est elle-même liée à l'énergie de transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome. Ces horloges, toujours perfectionnées, sont les plus précises du monde (une seconde sur 100 millions d'années) et servent à la définition de la seconde. Pour Noël Dimarcq « Le spectre d'applications des horloges atomiques est extrêmement large. La synchronisation d'horloges est essentielle aux réseaux de télécommunications, aux observations astronomiques par les systèmes d'interférométrie à longue base ou à la navigation des sondes dans le Système solaire.

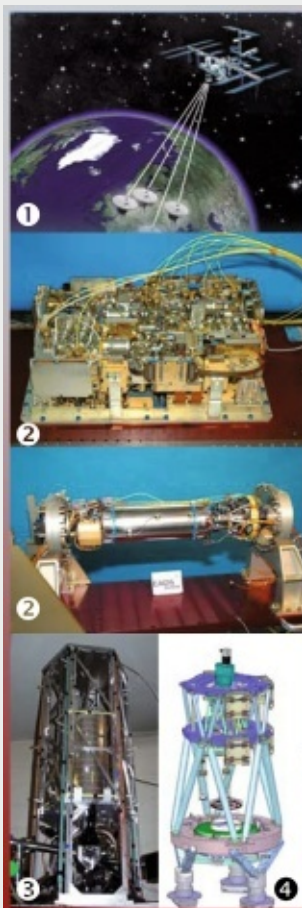
Cette amélioration des mesures viendra peut-être un jour contrarier des précisions supposées infaillibles. Tout physicien rêve de vivre une telle révolution associant l'amertume de la théorie abandonnée à l'excitation des domaines à découvrir. »



Yvan Castin, Michèle Leduc, David Guéry-Odelin, Claude Cohen-Tannoudji



Hélène Perrin s'interrogeant sur la marche de l'expérience



Les atomes froids mesurent l'espace-temps

Une application phare des recherches de l'IFRAF est le développement de concepts innovants de « capteurs d'espace-temps ». Dans ces instruments de très haute précision, l'aspect ondulatoire des atomes froids est exploité pour réaliser des interférences dont le résultat dépend d'une fréquence, d'une vitesse de rotation, d'une accélération, du champ de pesanteur.

Le laboratoire SYRTE (*) pilote de nombreux projets en partenariat avec d'autres équipes de l'IFRAF, les grandes agences spatiales et de défense, le monde industriel. Les domaines d'application sont très variés : métrologie fondamentale, test des lois fondamentales de la physique au sol et dans l'espace, échelles de temps atomique, navigation, positionnement, synchronisation, géophysique, etc.

(*) Le SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace est une unité mixte de recherche du CNRS, de l'Observatoire de Paris, de l'Université Pierre et Marie Curie et du LNE - Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.

① Comparaison d'horloges sol avec la mission spatiale ACES ; ② Horloge spatiale PHARAO ; ③ Fontaine atomique ; ④ Gravimètre atomique ; ⑤ Horloge à réseau optique d'atomes de strontium ; ⑥ Gyromètre à atomes froids ; ⑦ Horloge compacte à atomes froids pour GALILEO ; ⑧ Horloge optique à atomes de mercure



Votre solution laser à solide

Quantel, acteur majeur dans le secteur des lasers à solide, développe depuis 40 ans un savoir-faire unique pour concevoir, fabriquer et commercialiser dans le monde entier des produits innovants.

www.quantel-laser.com

UN SOUTIEN INDUSTRIEL À LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

Quantel, membre du directoire de l'IFRAF depuis la création de l'Institut, participe à la vie de la communauté scientifique en apportant sa vision industrielle au sein de la Société Française d'Optique, d'OpticsValley ou d'autres organismes.

UNE COLLABORATION ÉTROITE AVEC L'IFRAF

Quantel collabore dans le domaine des lasers à fibre pour le pompage d'atomes froids avec plusieurs laboratoires de l'IFRAF dont l'Institut d'Optique (IOGS).

Conception : Pousières d'Étoiles 01/11
Crédit photo : Agence Photonics - Grande Bretagne



LA QUÊTE D'UNE THÉORIE unifiée des interactions

Monsieur Unification Entretien avec Steven Weinberg, page 62 • **L'indivisible** la théorie unifiée par Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, page 65 • **Une théorie géométrique du Tout** par Garrett Lisi et James Weatherall, page 68

Pour décrire et comprendre les phénomènes de la nature, les physiciens ont toujours recherché des lois générales et reposant sur le plus petit nombre de paramètres. Cette quête est particulièrement flagrante en physique des particules, où la quête d'une théorie unificatrice est entamée depuis les années 1930 au moins.

Quatre interactions fondamentales ont été identifiées dans la nature : la gravitation, la force électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte, ces deux dernières n'agissant qu'à l'échelle des noyaux atomiques et en deçà. La théorie classique de l'électromagnétisme, œuvre de James Clerk Maxwell vers 1865, est elle-même une théorie (classique) qui unifie l'électricité et le magnétisme. Mais l'étape suivante dans l'unification des interactions fondamentales n'a été franchie qu'au début des années 1970, avec la théorie électrofaible, l'union de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible, pour laquelle trois de ses principaux protagonistes, Steven Weinberg, Abdus Salam et Sheldon Glashow ont été récompensés par le prix Nobel en 1979.

La théorie électrofaible réunit l'interaction électromagnétique et l'interaction faible en un seul édifice, une théorie quantique des champs fondée sur d'élégants principes de symétrie. Sa confirmation expérimentale la plus spectaculaire a été la découverte, au CERN, en 1982 et 1983, des bosons W et Z prédits par la théorie. Une autre particule clef de la théorie, le quark top, n'a pas encore été observée à ce jour, mais que l'on espère bien détecter prochainement grâce au collisionneur LHC du CERN, entré en fonction il y a huit mois.

Dans les années 1970 également, une théorie cohérente de l'interaction forte, fondée sur les mêmes principes de symétrie, a été développée. L'interaction électrofaible, à ce jour, sous le nom de chromodynamique quantique. La juxtaposition de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quan-

tique constitue le « modèle standard » de la physique des particules.

Ce modèle est une théorie quantique qui n'inclut pas la quatrième interaction fondamentale, la gravitation, décrite par la relativité générale d'Einstein — une théorie non quantique. Les physiciens en quête d'unification sont ainsi confrontés à plusieurs défis apparentés : construire une théorie quantique de la gravitation, aller au-delà du modèle standard pour éliminer les parts d'ombre et d'arbitraire qu'il contient.

Malgré des décennies de recherche, le chantier de l'unification reste inachevé. Le dossier que nous publions ici résume les enjeux, les difficultés et les pistes existantes selon lui.

Dans le deuxième article, Stephen Hawking et Leonard Mlodinow attirent notre attention, au travers de l'état actuel de la « théorie des cordes », sur le fait que la théorie unifiée tant recherchée est peut-être une utopie : plusieurs édifices complémentaires et en partie distincts pourraient être nécessaires.

Enfin, dans le troisième article, Garrett Lisi et James Weatherall présentent — en utilisant le langage des « fibrés » plutôt que le langage habituel de la théorie des groupes de symétrie — une voie de recherche qui s'appuie sur les mêmes principes géométriques que la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique. G. Lisi, physicien extérieur au milieu scientifique professionnel, a été très médiatisé en 2007 en publiant sur Internet une ébauche de théorie unificatrice fondée sur un groupe noté E_8 . Ses travaux laissent toujours sceptiques la plupart des spécialistes du domaine.

Même si, à ce jour, ces tentatives ne révèlent un jour non pertinentes, son article a le mérite de bien retracer la série de tentatives qui ont été faites pour étendre le modèle standard.

Monsieur Unification

La construction d'une théorie unifiant les interactions fondamentales de la physique est un chantier ouvert depuis des décennies.

Steven Weinberg est l'un de ses principaux protagonistes.

Entretien avec Steven Weinberg

→ Le collisionneur LHC, au CERN, suscite beaucoup d'espoirs. Certains ont comparé les résultats attendus avec les révolutions quantique et relativiste du premier tiers du XX^e siècle. Qu'en pensez-vous ?

→ Steven Weinberg

On peut imaginer que ces résultats vont conduire à une révolution de notre pensée en physique comparable à celle du début du XX^e siècle, mais ce n'est pas une certitude. Pour qu'une telle révolution se produise, il faut qu'arrive quelque chose de complètement imprévu... que je ne peux donc pas prévoir !

À court terme, nous essayons d'avancer au-delà du modèle standard, et aussi d'imaginer ce qui s'est passé aux débuts de l'Univers. Cela prendra du temps. Nous espérons ensuite pouvoir tout relier, et disposer enfin d'une théorie rendant compte de toutes les particules et de toutes leurs interactions. Nous ignorons à quoi elle ressemblera.

Quand nous aurons une compréhension vraiment complète de la nature au niveau le plus fondamental, elle diffusera dans la société. Elle sera probablement très mathématique, et le grand public mettra longtemps à comprendre, comme il a fallu longtemps avant que les scientifiques eux-mêmes comprennent la théorie de Newton. Mais cette dernière est finalement eu une profonde influence sur la façon dont les gens en général conçoivent le monde et la vie humaine. Elle a eu des répercussions sur l'économie, la biologie, la philosophie, la religion. Une situation semblable pourrait se produire si

nous parvenons à une théorie vraiment complète de la nature.

Notre représentation de la nature se fait de plus en plus globale, et des énigmes d'autrefois, comme la nature des forces qui assurent la cohésion des particules au sein d'un atome, ont été parfaitement comprises – pour être aussitôt remplacées par de nouvelles énigmes, telle l'origine des propriétés des particules élémentaires, particules du modèle standard. Et le processus par lequel on explique des énigmes tout en suscitant de nouvelles se poursuivra longtemps.

Ce n'est qu'une supposition, mais je pense que nous parviendrons à un point où il n'y aura plus le même genre d'énigmes. Et ce sera alors un remarquable tournant dans l'histoire de la pensée.

→ La découverte du boson de Higgs est le premier grand objectif poursuivi au LHC. On suppose que les physiciens du Tevatron, au Fermilab, ne le trouvent pas en premier. Dans quelle mesure l'unification électrofaible et le modèle standard dépendent-ils du boson de Higgs ?

→ Steven Weinberg

Le modèle standard repose complètement sur l'existence d'une brisure de la symétrie électrofaible. Mais si vous vous demandez pourquoi la symétrie est brisée, le doute est permis. Le mécanisme de brisure de symétrie mis en œuvre dans le modèle de Weinberg-Salam (le secteur électrofaible du modèle standard) requiert l'existence d'une nouvelle particule, qui a pris le nom de boson de Higgs. Ce modèle simple a conduit à la pré-

diction du rapport des masses des bosons faibles, une prédiction qui semble très bonne.

Pour autant, une autre possibilité existe : que la symétrie soit brisée par des interactions fortes d'un type nouveau, de façon qu'il n'y ait pas le boson de Higgs. Ces nouvelles interactions devraient être bien plus fortes que l'interaction forte ordinaire. Lenny Susskind et moi avons, indépendamment, mis au point une théorie sur ce principe que nous avons en commun accord nommée Technicolour. Elle prédit bien elle aussi les masses des bosons faibles, mais peine à expliquer les masses des quarks. Certains théoriciens continuent de travailler sur la Technicolour. Si cette théorie est pertinente, le LHC devrait la mettre en évidence, ainsi que tout un ensemble de particules nouvelles.

Ainsi, même si le LHC ne trouve pas le boson de Higgs, il se peut que ce collisionneur trouve autre chose d'équivalent, par exemple des indices de la validité de la Technicolour. De fait, on montre que sans particules nouvelles, on a des incohérences mathématiques.

→ Un autre principe que les physiciens espèrent confirmer au LHC est la supersymétrie, l'idée selon laquelle les particules médiatrices des interactions, tels les bosons faibles, et les particules de matière, telles que les électrons et les quarks, sont intimement reliées. Certains physiciens ont autant confiance dans la supersymétrie qu'Einstein en avait dans la relativité : elle est si convaincante qu'elle ne peut qu'être vraie. Est-ce aussi ce que vous pensez ?

→ Steven Weinberg

Non. La relativité restreinte s'inscrivait dans tout ce qui était déjà connu théoriquement et expérimentalement à la fin du XIX^e siècle : à savoir la théorie électromagnétique de Maxwell, et le fait que personne ne parvenait à découvrir les effets de l'« éther » dont on supposait qu'il remplissait tout l'espace. Si j'avais eu la chance d'inventer la relativité restreinte en 1905, j'aurais ressenti comme Einstein que cette théorie ne pouvait qu'être juste.

Je ne ressens pas les choses de la même façon à propos de la supersymétrie. Cette théorie a quelques succès mineurs à son actif : elle améliore la prédiction d'un paramètre crucial du modèle standard ; elle fournit un candidat naturel pour les particules de matière noire ; elle a aussi la très séduisante propriété d'être la seule symétrie susceptible d'unifier des particules comme les bosons faibles avec des particules comme les électrons. Mais rien de cela n'est assez impressionnant pour me convaincre que la supersymétrie est nécessairement juste.

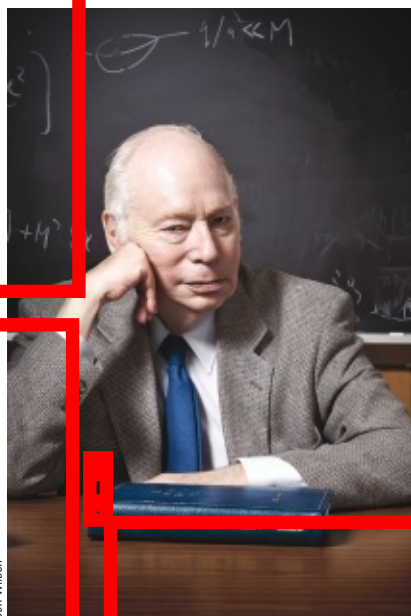
→ Vous avez avancé que le principe anthropique – l'idée que certains aspects de notre Univers n'ont pas d'explication plus profonde que le fait que nous vivons dans une partie particulièrement habitable – d'un domaine plus vaste – est notre meilleure explication de la densité d'énergie sombre, cette mystérieuse substance responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Pouvez-vous nous en parler ?

→ Steven Weinberg

Nous spéculons beaucoup sur ce que nous considérons comme fondamental, par exemple la masse des particules, les différentes interactions, les trois dimensions d'espace, l'absence d'une dimension de temps, mais il se pourrait que tout cela ne soit pas fondamental, mais lié à notre environnement. L'Univers pourrait être beaucoup plus grand que nous ne l'avons imaginé, et englober beaucoup plus que le Big Bang observé autour de nous. Il pourrait comprendre différentes parties – par « parties », je désigne différentes choses pos-

sibles – dotées de propriétés très différentes de ce que nous nommons les principes fondamentaux de la nature pourraient être différents, et où même les dimensions d'espace et de temps seraient différentes. Il devrait y avoir un grand principe sous-jacent qui décrit l'ensemble, mais il se pourrait que nous soyons bien plus loin de le découvrir que nous ne l'imaginons aujourd'hui.

Quand j'ai commencé à écrire sur ce sujet en 1987, j'avais l'esprit complètement



Jeff Wilson

Steven WEINBERG, prix Nobel de physique en 1979 pour sa contribution à la théorie électrofaible, professeur à l'université du Texas à Austin (États-Unis).

Ses propos ont été recueillis par Amir ACZEL, chercheur à l'Université de Boston et écrivain.

ouvert – et c'est toujours le cas aujourd'hui – quant aux diverses façons dont on pourrait concevoir ces parties de l'Univers, avec des propriétés telles que des densités d'énergie sombre différentes. Une des pistes est l'inflation chaotique d'Andrei Linde, qui suppose de nombreux Big Bang se produisant épisodiquement ici ou là, chacun étant caractérisé par des valeurs différentes de paramètres tels que la densité d'énergie sombre.

Comme Stephen Hawking le décrit (voir l'article de S. Hawking et L. Mlodinow dans

ce numéro), l'Univers pourrait être une superposition quantique de plusieurs états, comparables au célèbre chat de Schrödinger (un chat à la fois vivant et mort imaginé par Erwin Schrödinger pour exprimer la notion de superposition quantique d'états). Ainsi, comme il est possible en théorie quantique d'un chat se trouve dans deux états à la fois, l'un où il est vivant, l'autre où il est mort, il en va peut-être de même pour l'Univers. Dans l'état où le chat est vivant, le chat sait qu'il est vivant, et dans l'autre état il ne sait rien du tout. De même, il y aurait des états de l'Univers comportant des chercheurs explorant ce qui leur semble être l'Univers entier, et d'autres états où peut-être l'Univers est trop petit ou évolue trop vite, et où il n'y a personne pour l'explorer.

Les arguments anthropiques prédisent que la densité de l'énergie sombre doit être assez faible pour que puissent se former des galaxies, mais pas trop, parce que les univers où elle est nettement plus petite sont rares. Un calcul que j'ai effectué en 1998 avec deux astrophysiciens de l'Université du Texas à Austin, Hugo Martel et Paul Shapiro, suggèrerait que toute énergie sombre devrait être en quantité assez importante pour qu'on la découvre bientôt. Et peu de temps après, les astronomes découvriraient son existence.

→ Vous faites le lien entre deux communautés différentes de physiciens : ceux qui font de la cosmologie et de la relativité générale, et ceux qui font de la physique des particules et de la théorie quantique. Cette double expertise vous aide-t-elle à voir comment unifier les deux domaines ?

→ Steven Weinberg

Pour le moment, je ne vois aucune direction d'unification. J'aurais certainement aimé en voir l'absence d'idées sur les voies possibles vers l'unification, qui me viennent de la physique expérimentale des particules, mais il est beaucoup trop tôt pour dire si ces idées ont un rapport quelconque avec la réalité.

On présente souvent la théorie des cordes comme la seule façon de traiter le problème des infinis apparaissant en théorie

quantique de la gravitation, mais une alternative existe, fondée sur des théories quantiques des champs du même type général que celle utilisée dans le modèle standard. Cette idée, que j'ai nommée protection asymptotique, affirme que l'intensité des forces évolue vers des valeurs finies aux hautes énergies : elles y sont empêchées (protégées) d'atteindre l'infini.

Cette idée a longtemps stagné parce qu'il est difficile de montrer que les théories sont ou ne sont pas asymptotiquement protégées. J'ai fait des calculs préliminaires, que j'ai trouvés encourageants, mais leur poursuite était trop difficile, et j'ai travaillé sur d'autres choses. Puis, un peu avant 2000, un certain nombre de chercheurs en Europe

se sont emparés du sujet, et ils ont établi la protection asymptotique dans diverses approximations et montré qu'elles sont

mathématiquement aussi bien définies que le modèle standard.

→ En quoi cette approche est-elle différente de la théorie des cordes ?

→ Steven Weinberg

Elle procède à l'opposé de ce que l'on fait en théorie des cordes. Dans cette dernière, on abandonne la théorie quantique des champs usuelle pour inventer quelque chose de vraiment nouveau. La théorie des cordes est un grand pas dans une direction nouvelle. La protection asymptotique consiste plutôt à partir du fait que la bonne vieille théorie des champs, celle avec laquelle nous travaillons depuis 60 ou 70 ans, est tout ce

dont nous avons besoin.

Je ne vais pas faire particulièrement l'article en faveur de la protection asymptotique.

S'il devait s'avérer que la vérité est du côté de la théorie des cordes, je ne serais pas surpris. Cette théorie est belle du point de vue mathématique. La protection asymptotique n'est qu'une possibilité qui vaut aussi la peine d'être explorée sérieusement.

Jusqu'à présent, aucune de ces deux approches n'a débouché sur une percée, comme le serait le calcul des paramètres du modèle standard, dont les valeurs (précises) sont données sans explication. Comprendre pourquoi les masses des particules présentent les rapports qu'on leur connaît serait le véritable test. Ces masses sont une énigme comparable à un texte dans une écriture ancienne telle que le linéaire A : nous avons le texte mais nous ignorons sa signification.

S. Weinberg, *Lake Views : This World and the Universe*, Belknap Press, 2010.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau

en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

L'insaisissable théorie unifiée

Stephen Hawking et Leonard Mlodinow

Les physiciens recherchent une théorie décrivant de façon unifiée les quatre interactions fondamentales. Mais ils auront peut-être besoin de plusieurs théories...

L'ESSENTIEL

✓ Nous modélisons la réalité physique à partir de ce que nous voyons du monde, qui dépend de nous et de notre point de vue. Dès lors, un « réalisme dépendant du modèle » semble préférable au réalisme absolu habituel en physique.

✓ Or la théorie des cordes, candidate préférée des physiciens au titre de la théorie du Tout, se présente sous cinq formulations différentes, valables chacune dans certaines conditions.

✓ Des liens mathématiques relient toutefois ces cinq théories et un réseau nommé théorie M. Cette dernière est-elle la théorie tant recherchée ?

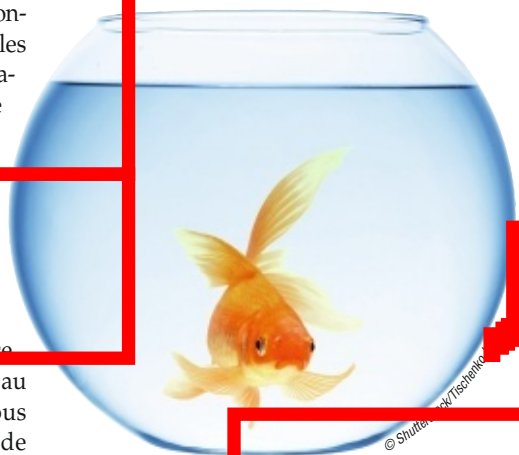
Le conseil municipal de Monza, en Italie, a interdit un jour de mettre les poissons rouges dans des bocaux ronds. C'est pure cruauté, ont justifié les édiles, car cela impose aux pauvres poissons une vision déformée de la réalité. Pour curieuse qu'elle soit, cette anecdote pose une intéressante question philosophique : comment savons-nous que la réalité que nous percevons est vraie ? Celle que voit le poisson diffère de la nôtre, mais est-elle pour autant moins réelle ?

En physique, cette question n'est pas gratuite. Les physiciens et les cosmologistes se trouvent dans une situation similaire à celle du poisson rouge : depuis des décennies, ils s'efforcent de mettre au point une « théorie ultime du Tout », c'est-à-dire un ensemble complet et cohérent de lois fondamentales capable d'expliquer tous les aspects de la réalité. Or voilà qu'il apparaît que cette quête pourrait conduire non pas à une théorie unique, mais à toute une famille de théories reliées, chacune décrivant sa propre version de la réalité, comme si elle voyait l'Univers depuis son propre bocal...

Cette idée est difficile à accepter, y compris pour nombre de physiciens. La plupart des gens croient en l'existence d'une réalité objective et extérieure, et au fait que nos sens et notre science nous renseignent directement sur le monde

matériel. La science classique est fondée sur la conviction qu'il existe un monde extérieur, dont les propriétés sont bien définies et indépendantes de l'esprit de l'observateur. En philosophie, cette doctrine se nomme « réalisme ».

Ceux qui se souviennent de Timothy Leary (un psychologue américain partisan du usage thérapeutique du LSD) et des années 1960 savent qu'il y a une autre possibilité : la conception de la réalité peut dépendre de l'esprit de celui qui la perçoit. À des différences subtiles près, ce point de vue se décline sous les noms d'antiréalisme, d'instrumentalisme ou encore d'idéalisme. Dans ces doctrines, le monde que nous connaissons est construit par l'esprit humain à partir de la matière brute des données sensorielles, et est mis en forme par le cerveau. Ce point de vue peut sembler difficile à



© Shutterstock/Techphoto

accepter, mais pas à comprendre. S'agissant de notre perception du monde, il n'existe aucun moyen de supprimer l'observateur - c'est-à-dire nous.

Les développements de la physique sont tels que le réalisme devient difficile à défendre. En physique classique (la physique newtonienne, qui décrit bien nos expériences quotidiennes), l'interprétation de termes tels qu'« objet » et « position » est pour l'essentiel en harmonie avec notre compréhension « réaliste », de bon sens, de ces concepts. Mais nous sommes des instruments de mesure grossiers. Les physiciens ont découvert que les objets qui nous entourent et la lumière grâce à laquelle nous les voyons sont constitués d'objets (tels les électrons et les photons) que nous ne percevons pas directement. Ces objets ne sont pas régis par les lois de la physique classique, mais par celles de la théorie quantique.

La réalité de la théorie quantique est en rupture radicale avec celle de la physique classique. En théorie quantique, les particules n'ont ni position définie ni vitesse définie avant qu'un observateur ne mesure ces quantités. Dans certains cas, des objets individuels n'ont même pas d'existence indépendante, mais existent seulement en tant que partie d'un ensemble. La physique quantique a aussi des implications importantes sur notre conception du passé. Alors que la physique classique voit le passé comme une série définie d'événements, en physique quantique le passé, comme le futur, n'existent qu'en tant qu'éventail de possibilités. Même l'Univers dans son ensemble n'a pas de passé unique. La physique quantique implique donc une réalité différente de celle de la physique classique, même si cette dernière correspond à notre intuition et nous est fort utile pour construire des immeubles ou des ponts.

Ces exemples nous amènent à une conclusion importante : il n'y a pas de concept de réalité indépendant de toute représentation ou théorie. C'est pourquoi nous préférons plutôt un « réalisme dépendant du modèle ». Dans cette vision, une théorie physique ou une représentation du monde n'est qu'un modèle et un ensemble de règles qui relient les éléments du modèle aux observations. Il est alors vain de se demander si un modèle est réel ; il importe seulement qu'il soit en accord avec les observations. Si deux modèles sont compatibles avec les

observations, aucun des deux ne peut être considéré plus réel que l'autre.

Plusieurs réalités selon le point de vue ?

L'idée de réalités alternatives est l'un des piliers de la culture populaire moderne. Par exemple, dans le film *Matrix*, les hommes vivent sans le savoir dans une réalité virtuelle créée par des ordinateurs intelligents ; le but de ces machines est de maintenir les humains dans une léthargie satisfaite et paisible, afin de pouvoir pomper leur « énergie bioélectrique » (allez savoir ce que c'est...). Le film pose une



COMME UN POISSON ROUGE dans son bocal, nous sommes enfermés dans un point de vue sur l'Univers. Nous pouvons modéliser ce qui se passe hors du bocal, mais sans nous affranchir de notre point de vue. Dès lors, il est peut-être inévitable que la quête d'une théorie du Tout produise plusieurs solutions, impossibles à unifier sous le périscope d'un regard extérieur à l'Univers ?

bonne question : comment pouvons-nous être sûrs que nous ne sommes pas des êtres vivant dans un monde factice ?

Si nous vivions dans un monde synthétique imaginaire, les événements s'y dérouleraient n'auraient pas nécessairement de logique ou de cohérence, ou n'obéiraient pas forcément à des lois. Les maîtres nous contrôlant pourraient trouver intéressant ou amusant de tester nos réactions, par exemple en nous faisant brus-

quement décider de tous haïr le chocolat, ou que la guerre est inenvisageable, mais rien de tel n'est arrivé. Si ces maîtres supposés n'avaient des lois cohérentes, nous n'aurions aucun moyen de savoir qu'il existe une autre réalité derrière la réalité simulée. Il est facile d'étiqueter le monde des maîtres comme « réel », et le monde engendré par ordinateur comme « faux ». Mais, si (comme nous), les êtres du monde virtuel ne pouvaient voir dans leur univers depuis l'extérieur, quelles raisons auraient-ils de mettre en doute leur propre vision de la réalité ?

Les poissons rouges sont dans une situation identique. Depuis leur bocal courbe, ils ne voient pas la même chose que nous qui regardons du dehors, mais ils pourraient néanmoins formuler des lois gouvernant le mouvement des objets extérieurs au bocal. Par exemple, puisque la lumière est défléchie en passant de l'air à l'eau, un objet qui est pour nous sur une trajectoire rectiligne serait perçu par le poisson rouge comme décrivant une trajectoire courbe. Depuis leur référentiel déformé, les poissons savants pourraient formuler des lois toujours vérifiées et autorisant des prédictions sur le mouvement des objets extérieurs au bocal. Leurs lois seraient plus compliquées que dans notre référentiel, mais la simplicité est une question de goût ! Si les poissons rouges formulaient une telle théorie, nous devrions admettre que leur vision est une représentation valable de la réalité.

Un exemple concret et célèbre de représentation différentes de la réalité est le contraste entre le modèle du cosmos de Ptolémée (centré sur la Terre) et celui de Copernic (centré sur le Soleil). On a beau dire que Copernic a donné tort à Ptolémée, cela n'est pas vrai. Comme dans le cas de notre vision opposée à celle du poisson rouge, on peut utiliser l'une ou l'autre représentation comme modèle de l'Univers, parce que nous pouvons expliquer nos observations de la voûte céleste indifféremment en supposant que la Terre ou que le Soleil est au repos. En dépit de son rôle dans les débats philosophiques sur la nature de notre Univers, le véritable avantage du système copernicien est que les équations du mouvement sont beaucoup plus simples dans le référentiel où c'est le Soleil qui est au repos.

Le réalisme dépendant du modèle s'applique non seulement aux modèles scientifiques, mais à tous les modèles men-

taux conscients et subconscients que nous créons tous pour interpréter et comprendre le monde de tous les jours. Par exemple, le cerveau humain traite les données brutes du nerf optique, combinant les données des deux yeux, augmentant la résolution et comblant les lacunes telles que celle du point aveugle de la rétine. De plus, il crée l'impression d'un espace tridimensionnel à partir des données bidimensionnelles de la rétine. Quand vous voyez une chaise, vous avez simplement utilisé la lumière diffusée par la chaise pour construire une image mentale, c'est-à-dire un « modèle » de la chaise. Le cerveau est tellement doué pour construire des modèles que si on équipe les gens de lunettes qui renversent l'image, leur cerveau change le modèle de telle sorte qu'ils voient à nouveau les choses dans le bon sens... et, avec un peu de chance, avant qu'ils aient le temps d'essayer de s'asseoir !

Cinq théories ultimes ?

Dans la quête pour découvrir les principes ultimes de la physique, aucune approche n'a suscité autant d'espoirs que la théorie des cordes. Cette théorie a été proposée dans les années 1970 comme tentative d'unification des quatre interactions fondamentales de la nature en un cadre cohérent. Elle visait particulièrement à faire entrer la gravitation dans le cadre de la théorie quantique. Toutefois, dès le début des années 1990, les physiciens se sont aperçus que la théorie des cordes souffrait d'un malencontreux défaut : en fait, il y en a cinq différentes ! Pour ceux qui poussaient « la » théorie des cordes en tant que « théorie du Tout », c'était pour le moins embarrassant.

Au milieu des années 1990, les chercheurs ont commencé à découvrir que ces différentes théories (à laquelle s'ajoutait désormais la supergravité) décrivent en fait le même phénomène, ravivant leur espoir d'en faire finalement une théorie unifiée. Ces théories sont effectivement reliées parce que les physiciens nomment des dualités, qui sont une sorte de dictionnaire mathématique pour traduire les concepts dans un sens ou dans l'autre. Malheureusement, chaque théorie n'est une bonne description des phénomènes que dans un ensemble donné de conditions (par exemple, uniquement pour les basses énergies). Aucune ne peut décrire à elle seule tous les aspects de l'Univers.

Les théoriciens des cordes sont maintenant convaincus que les cinq théories des cordes différentes sont juste différentes approximations d'une théorie plus fondamentale qui serait la « théorie M » (personne ne semble savoir à quoi correspond M. Il pourrait désigner le terme « maîtresse », « miracle » ou « mystère », ou les trois). On essaye encore de déchiffrer la nature de la théorie M, mais il semble que l'attente habituelle d'une théorie unique de la nature ne soit pas tenable, et que pour décrire l'Univers, il nous faudra appliquer différentes théories dans différentes situations.

Un réseau de théories

Ainsi, la théorie M n'est pas une théorie au sens classique du terme, mais un réseau de théories. Elle est comparable à une carte géographique. Pour représenter fidèlement l'ensemble de la Terre sur une surface plane, on doit recourir à un ensemble de cartes, qui couvrent chacune une région limitée. Les cartes se recouvrent à certains endroits, et là où il y a chevauchement, elles montrent le même paysage. De même, les différentes théories de la famille de la théorie M peuvent sembler très différentes, mais on peut les considérer comme des versions de la même théorie sous-jacente. Elles prédisent toutes les mêmes phénomènes là où elles se chevauchent, mais aucune ne fonctionne bien dans toutes les situations.

À chaque fois que nous développons un modèle de l'Univers qui fonctionne bien, nous avons tendance à attribuer à ce modèle la qualité de réalité ou de vérité absolue. Mais la théorie M, comme dans l'exemple du poisson rouge, montre qu'une même situation physique peut être modélisée de différentes façons, utilisant chacune des éléments fondamentaux et des concepts différents.

Il se pourrait que pour décrire l'Univers, nous ayons à appliquer différentes théories dans différentes situations. Chaque théorie peut avoir sa propre version de la réalité, mais d'après le réalisme dépendant du modèle, cette diversité est acceptable, et on ne peut dire d'aucune version qu'elle est plus réelle qu'une autre. Ce n'est pas ce que les physiciens attendaient *a priori* d'une théorie de la nature, et cela ne correspond pas non plus à l'idée que l'on se fait d'ordinaire de la réalité. Mais l'Univers est peut-être ainsi. ■

LES AUTEURS



Stephen HAWKING, professeur émérite de mathématiques à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, est l'auteur de travaux essentiels sur la compréhension moderne des trous noirs et des débuts de l'Univers.

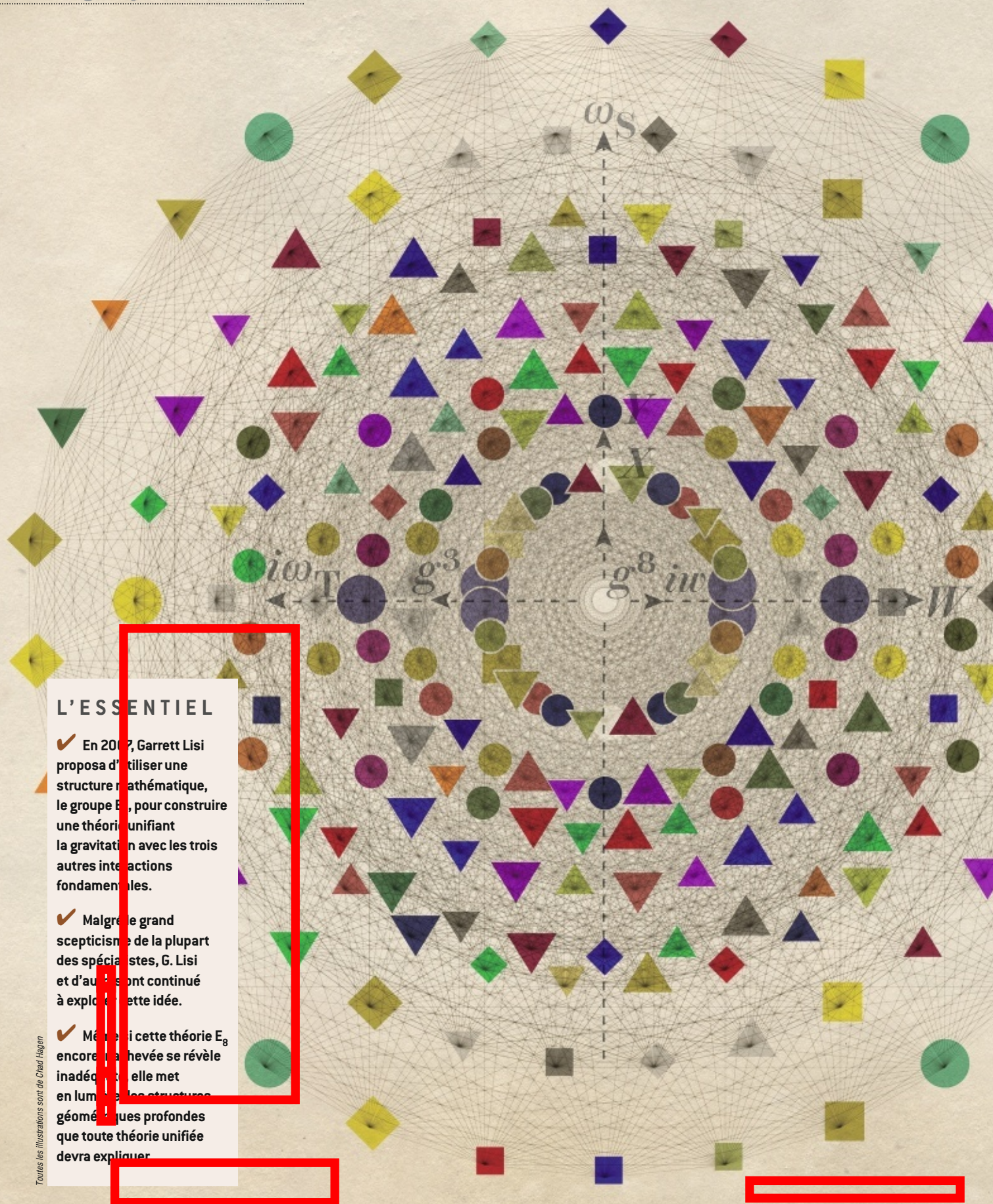
Leonard MLODINOW est physicien théoricien à l'Institut de technologie de Californie.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Hawking et L. Mlodinow, *The Grand Design*, Bantam Books, 2010.

J. Maldacena, *La gravité est-elle illusion ?*, *Pour la Science*, n° 339, janvier 2005.

M. J. Duff, *Les nouvelles théories des cordes*, *Pour la Science*, n° 246, avril 1998.



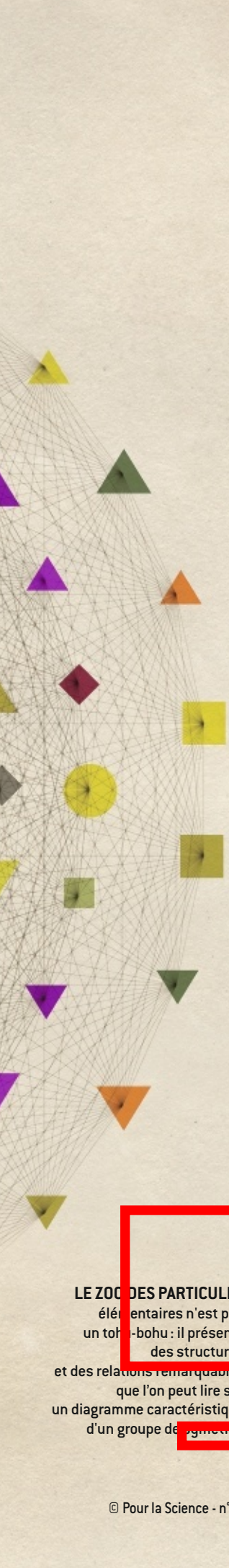
L'ESSENTIEL

✓ En 2007, Garrett Lisi proposa d'utiliser une structure mathématique, le groupe E_8 , pour construire une théorie unifiant la gravitation avec les trois autres interactions fondamentales.

✓ Malgré le grand scepticisme de la plupart des spécialistes, G. Lisi et d'autres ont continué à explorer cette idée.

✓ Même si cette théorie E_8 n'a encore jamais été vérifiée, elle met en lumière des structures géométriques profondes que toute théorie unifiée devra expliquer.

Toutes les illustrations sont de Chad Hagen



Une théorie géométrique du Tout

Garrett Lisi et James Weatherall

Les particules élémentaires et leurs interactions reflètent sans doute une structure géométrique profonde de la nature. Cette structure a-t-elle quelque chose à voir avec le groupe de symétrie E_8 ?

La physique moderne commencée en 1687 d'un processus d'unification. Avec sa loi universelle de la gravitation, Isaac Newton montrait que les descriptions théoriques d'alors des mouvements du pendule, des planètes, des marées, etc., n'étaient en fait que différentes facettes d'une même théorie. Depuis, les unifications se succèdent et jouent un rôle central en physique. Au XIX^e siècle, James Clerk Maxwell fusionna électricité et magnétisme. L'électromagnétisme résultant fut unifié 100 ans plus tard, vers 1970, avec la théorie de l'interaction faible – qui régit la radioactivité bêta – ce qui a donné la théorie dite électrofaible.

À rechercher les phénomènes attendus par la théorie électrofaible qu'à recueillir les signatures possibles d'une éventuelle théorie du « Tout », décrivant toutes les particules et leurs interactions.

La meilleure théorie actuelle des interactions non gravitationnelles – à savoir l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte – a été élaborée dès les années 1970. Qualifiée de « modèle standard » de la physique des particules, elle décrit ces interactions et les particules qu'elles mettent en jeu. La formulation mathématique de cette théorie repose sur des objets géométriques abstraits nommés groupes de Lie et espaces fibrés ou plus simplement « fibrés ».

Le modèle standard n'en reste pas moins une théorie composée d'éléments disparates, puisqu'un objet géométrique différent décrit chaque interaction. C'est pour réduire, voire faire disparaître cette imperfection que les physiciens n'ont cessé de tenter d'unifier les divers éléments du modèle standard et ont proposé des « théories de grande unification ». Dans chacune de ces théories, un objet géométrique unique est censé expliquer les interactions, mais nul ne sait laquelle de ces théories de grande unification est pertinente, ni même si l'une d'entre elles l'est.

Du reste, un problème d'unification plus profond se pose aux physiciens : l'intégration de l'interaction gravitationnelle et des trois autres interactions

Aller au-delà du modèle standard

La quête de l'unification a des motivations pratiques, philosophiques et esthétiques : la réunion de plusieurs théories physiques en une seule clarifie notre compréhension de l'Univers et en révèle des aspects insoupçonnés. Les physiciens, persuadés que les lois physiques découlent d'une unique structure mathématique, trouvent dans la théorie unifiée plus élégante. C'est pourquoi les expériences menées à l'aide d'accélérateurs comme le LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons), au CERN à Genève, servent autant

LE ZOO DES PARTICULES

élémentaires n'est pas un tohu-bohu : il présente des structures et des relations remarquables que l'on peut lire sur un diagramme caractéristique d'un groupe de symétrie.

fondamentales dans une même structure mathématique. Depuis les années 1980, la stratégie dominante pour ce faire est la théorie des cordes, qui tente de décrire la gravitation et les trois autres interactions en termes de cordes et de membranes vibrantes au sein d'un espace-temps ayant de nombreuses dimensions.

Un petit groupe de chercheurs explorent une autre voie : la « gravitation quantique à boucles ». Elle fait appel à un cadre mathématique moins élaboré, plus proche de celui du modèle standard. En s'appuyant sur ses idées, l'un d'entre nous, (G. Lisi) a proposé en 2007 une nouvelle théorie unifiée. L'idée directrice est d'étendre de façon cohérente à l'aide d'un groupe de Lie noté E_8 , le cadre géométrique des théories de grande unification pour y inclure la gravitation.

La « théorie E_8 », comme toutes les nouvelles idées, doit subir l'épreuve de l'expérience. Nombre de physiciens sont sceptiques, à juste titre, car cette théorie reste inachevée. Toutefois, même à ce stade précoce de développement, la théorie E_8 révèle certaines des structures profondes en jeu dans la nature, et prédit de nouvelles particules que le LHC découvrira peut-être.

Avant d'expliquer la théorie E_8 , commençons par poser les principes géométriques qui gouvernent les interactions. La géométrie est l'étude des formes. Oui, mais s'agissant de physique fondamentale, de

espace-temps, on peut les imaginer comme des espaces internes attachés à chaque point de l'espace-temps, dont la forme est liée aux propriétés des particules.

L'idée de formuler une théorie physique à partir des espaces fibrés fut introduite en 1918 par le mathématicien allemand Hermann Weyl (1885-1955). Les fibres à la H. Weyl sont distinctes des dimensions spatiales et sont postulées en théorie des cordes et des cordes de forme constante : leur évolution dans le temps découle de la façon dont elles sont rattachées à l'espace-temps quadridimensionnel.

Les champs électrique et magnétique présents partout dans notre espace peuvent être représentés par des fibres circulaires. Une fibre circulaire est associée au plus simple des groupes de Lie, qui est noté $U(1)$.

Rappelons qu'un groupe est, en mathématiques, un ensemble dont les éléments peuvent être composés de façon associative, dont un des éléments est neutre (son produit par n'importe quel élément donne cet élément) et dont chaque élément a un symétrique pour cette loi (son produit avec son symétrique donne l'élément neutre). Quant aux groupes de Lie (d'après le mathématicien norvégien du XIX^e siècle Sophus Lie), ce sont des groupes à la fois continus (chaque élément peut être approché d'arbitrairement près par un autre élément) et lisses (on peut y faire du calcul différentiel).

Les champs des forces électrique et magnétique qui emplissent l'espace et évoluent dans le temps correspondent à la courbure de ce faisceau de fibres. Autrement dit, d'un point de vue géométrique, les champs électrique et magnétique sont déterminés par la façon dont les fibres évoluent par rotation dans l'espace et le temps. Une onde électromagnétique correspond à une ondulation par rotation de ces fibres circulaires successives dans l'espace-temps. Et un quantum d'une onde électromagnétique est un photon, c'est-à-dire une particule de lumière qui se propage et qui véhicule la force électromagnétique entre particules chargées.

Une fibre pour chaque type de particules

À chaque type de particules élémentaires correspond une fibre différente. Ainsi, tous les électrons du monde résultent de l'évolution dans l'espace-temps d'un même type de fibre, ce qui explique, entre autres, pourquoi tous les électrons sont identiques. Les fibres de particules électriquement chargées, tels les électrons, s'enroulent autour des fibres circulaires de l'électromagnétisme comme le filetage d'une vis, et cela en proportion de leurs charges électriques.

Parmi les « fermions » (les particules élémentaires de matière), les électrons ont une charge électrique de -1 (trois enroulements), les quarks u ont des charges électriques de $+2/3$ (deux enroulements dans l'autre sens), les quarks d ont une charge électrique de $-1/3$ (un enroulement), et les neutrinos une charge nulle. Les particules d'anti-matière, tels les positrons et les antiquarks, s'enroulent dans le sens contraire autour de la fibre circulaire de l'électromagnétisme, ce qui leur confère des charges électriques opposées.

Quand des particules entrent en collision, elles peuvent se transformer en d'autres particules, mais de façon que la charge totale reste la même. Ce point essentiel est la conséquence d'une propriété géométrique des fibres : quand deux particules se rencontrent, les enroulements de leurs fibres s'ajoutent. La représentation en termes de fibres explique ainsi ce que l'on sait de l'électromagnétisme. Les charges électriques décrivent la structure géométrique du monde constitué par les fibres électromagnétiques et matérielles (d'un électron par exemple), cette structure déterminant quelles sont les interactions possibles entre particules chargées.

MÊME INACHEVÉE, LA « THÉORIE E_8 » REVELE CERTAINES DES STRUCTURES PROFONDES EN JEU DANS LA NATURE ET PRÉDIT DE NOUVELLES PARTICULES.

quelles formes ? Il y a quelque 2400 ans, Platon associait des polyèdres réguliers à chacun des « éléments » tels que l'air ou le feu. De même, des objets géométriques fondamentaux peuvent être associés aux particules élémentaires. Il s'agit de formes géométriques parfaites et continues, invisibles parce qu'elles sont hors de notre espace, mais dont nous constatons les effets.

La principale idée géométrique sous-tendant le modèle standard est qu'à chaque point de l'espace-temps sont attachés des espaces mathématiques nommés « fibres », chacune correspondant à un type de particules. L'ensemble formé par l'espace-temps et les fibres rattachées à ses points constitue ce que l'on nomme un espace fibré. Les fibres n'appartiennent pas à notre

Par exemple, $U(1)$ est le groupe des nombres complexes de module un, dont chacun représente une rotation sur le cercle de rayon un. Le cercle unité est la fibre associée à $U(1)$. Il a une seule symétrie : une rotation de n'importe quel angle laisse le cercle inchangé. On nomme générateur du groupe de Lie $U(1)$ une rotation du cercle d'un angle infinitésimal.

De façon imagée, on peut donc dire que l'espace fibré de l'électromagnétisme est constitué de fibres circulaires successives attachées à chaque point de l'espace-temps (voir l'encadré page 71). Chose essentielle, chaque cercle peut tourner un peu sur lui-même par rapport à ses voisins immédiats. Le « champ de connexion » d'un espace fibré décrit la façon dont se correspondent des fibres voisines par ces rotations.

Les mêmes principes s'appliquent aux interactions faible et forte. Chacune de ces interactions nucléaires a son propre type de charge et ses propres particules médiatrices. La différence avec l'électromagnétisme est que les forces nucléaires sont décrites par des fibres plus complexes, constituées non pas d'un seul cercle, mais d'un ensemble de cercles écaillés fibres qui interagissent entre elles et avec les fibres des particules de matière selon leurs enroulements.

L'interaction faible est associée à un groupe de Lie tridimensionnel noté $SU(2)$. Sa géométrie est caractérisée par trois générateurs de symétrie, qui correspondent aux trois « bosons faibles » W^+ , W^- et W^3 médiateurs de l'interaction faible – de rôle analogue à celui du photon. Les cercles associés aux bosons W^+ et W^- dans $SU(2)$ s'enroulent en sens contraires autour des cercles associés à W^3 parce qu'ils ont des charges faibles W opposées, égales à $+1$ et -1 . Étant dotées d'une charge faible, ces particules interagissent entre elles ainsi qu'avec les particules de matière.

Les fibres des particules de matière qui participent à l'interaction faible s'enroulent autour du cercle de W^3 et d'autres cercles de $SU(2)$. Il existe deux sortes de fermions, qui se distinguent par leurs hélicités, c'est-à-dire par la façon dont leurs

spins (moments cinétiques intrinsèques) s'alignent sur leur quantité de mouvement. Seuls les fermions d'hélicité gauche (spin de sens opposé à la quantité de mouvement) ont des charges faibles ; ainsi, le quark u et le neutrino gauches ont chacun une charge faible $-1/6$ et le quark d et l'électron gauches ont une charge faible égale à $-1/2$. Pour les antiparticules, c'est l'inverse : seules les antiparticules d'hélicité droite ont une charge faible. En d'autres termes, notre Univers ne présente pas une symétrie gauche-droite : nous pouvons dire si nous regardons des interactions faibles directement ou dans un miroir. Cette asymétrie est l'une des nombreuses énigmes que devra résoudre une théorie unifiée.

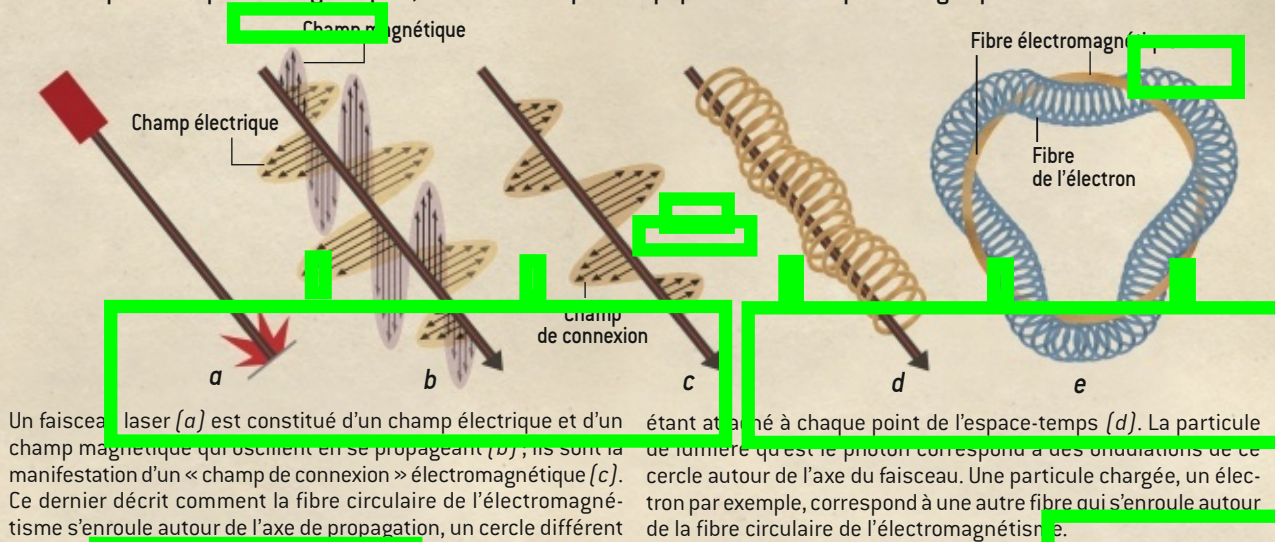
Des enroulements de fibres

Quand les physiciens ont unifié l'interaction faible avec l'électromagnétisme pour créer la théorie électrofaible, ils ont combiné la fibre associée à $SU(2)$ avec une fibre circulaire $U(1)$ particulière, associée à un précurseur de l'électromagnétisme nommé hypercharge, que l'on note Y . C'est pourquoi les fibres des particules de matière s'enroulent autour de ce cercle selon leur hypercharge. À l'intérieur du groupe de Lie de dimension quatre qui combine $SU(2)$

DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME À LA GÉOMÉTRIE

La vision géométrique de la nature découle naturellement de l'organisation du monde qui nous entoure. Les exemples les plus simples et les plus familiers sont les champs électriques et magnétiques. Les étincelles électriques et l'attraction magnétique et la lumière laser sont différentes manifestations des champs électriques et magnétiques, définis en tout point

de l'espace et à tout instant. En fait, les physiciens pensent que tout dans l'Univers – toutes les forces fondamentales et toutes les particules élémentaires de matière – découle de différents types de champs. Le comportement de ces champs suggère l'existence d'une structure géométrique sous-jacente qui peut être décrite par des « groupes de Lie » ou des « fibres ».

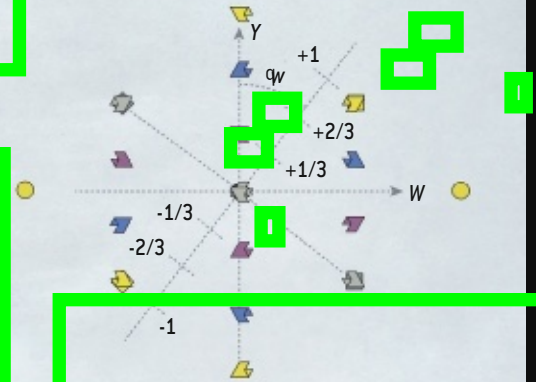


THÉORIES EN COURS D'ÉLABORATION

À chaque type de particule élémentaire correspond une fibre différente ; ces fibres s'enroulent autour de diverses fibres circulaires du photon et des autres bosons médiateurs des interactions. La façon dont la fibre représentant une particule s'enroule dépend de sa charge électrique, de sa charge faible, de son spin, de son type de charge et son type de boson médiateur. Le motif des charges, nommé diagramme de poids, par les mathématiciens, reflète la géométrie des enroulements de fibres, qui régissent les interactions des particules.

BOSONS	FERMIONS	
○ Photon	Neutrino	▲ Hélicité gauche, spin haut
● Bosons faibles	Électron	▲ Hélicité gauche, spin bas
● Gluons	Quark u	▲ Hélicité droite, spin haut
● Gravitons	Quark d	▲ Hélicité droite, spin bas
● Boson de Higgs	Quark u	▲ Hélicité droite, spin haut, anti
○ Boson plus faibles	Quark d	▲ Hélicité gauche, spin haut, anti
● Boson X	Quark u	▲ Hélicité gauche, spin haut, anti
● Autres bosons de Higgs	Quark d	▲ Hélicité gauche, spin bas, anti

Il existe deux types de particules élémentaires : les bosons (qui transmettent les interactions) et les fermions (constituant la matière). À droite, sont symbolisés tous les types de fermions, qu'ils agissent de fermions droits ou gauches, dotés d'un spin orienté vers le haut ou vers le bas, ou, des quarks, en trois couleurs. Comme le montre la colonne des fermions, ces symboles peuvent être empilés pour représenter des particules aux attributs différents au même endroit d'un diagramme de poids.



THÉORIE ÉLECTROFAIBLE : l'électromagnétisme et l'interaction faible sont les deux facettes de l'interaction électrofaible. Sur le diagramme de poids de cette interaction, les physiciens placent les particules d'après leur hypercharge (Y) et leur charge faible (W). Les bosons de Higgs (carrés gris en partie cachés) se trouvent sur une ligne oblique (d'en haut à gauche à en bas à droite), qui est aussi le lieu des points de charge électrique nulle. Les particules chargées se trouvent sur des lignes obliques parallèles : la charge électrique est une combinaison particulière de l'hypercharge et de la charge faible.

avec cet U(1) de l'hypercharge, les fibres circulaires de W^3 se combinent avec les fibres circulaires d'hypercharge pour former un tore bidimensionnel. Ce tore peut être découpé de différentes façons, un peu comme chacun peut couper à sa façon une couronne de pain.

Les fibres des particules connues sous le nom de bosons de Higgs s'enroulent autour du enchevêtrement de fibres circulaires du groupe de Lie électrofaible et déterminent un ensemble particulier de cercles, ce qui brise la symétrie, comme si quelqu'un imposait sa façon de trancher une couronne de pain. Les fibres associées aux bosons de Higgs ne s'enroulent pas autour de ces fibres circulaires qui correspondent alors au photon de masse nulle de l'électromagnétisme.

Perpendiculairement à ces fibres circulaires associées au photon, on a un autre ensemble de cercles, qui doit correspondre à une autre particule, que les pères de la théorie électrofaible ont nommée boson Z. Les fibres des bosons de Higgs s'enroulent autour des cercles du boson Z ainsi que des cercles du W^+ et du W^- , ce qui confère une masse non nulle à ces trois particules. Les expérimentateurs ont découvert les bosons W^+ , W^- et Z en 1983, ce qui a confirmé la pertinence de la théorie élec-

trofaible et montré comment des principes géométriques abstraits se traduisent concrètement dans le monde réel.

Une bonne façon de voir comment fonctionne la théorie électrofaible consiste à porter sur un diagramme les charges faibles et les hypercharges de toutes les particules connues (voir l'encadré ci-dessus et le suivant). Les mathématiciens nomment le résultat un « diagramme de poids », car ils désignent les charges par le terme générique de « poids ».

Les charges sur un diagramme

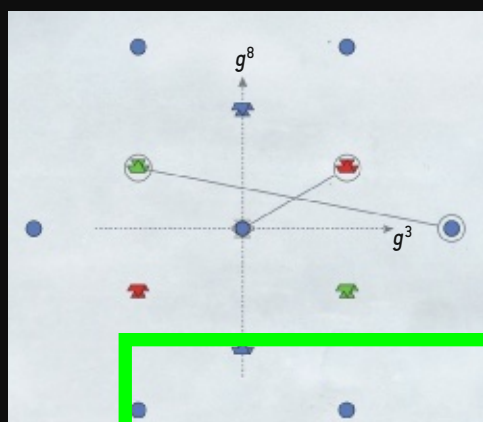
Dans ce diagramme, toutes les particules s'alignent sur des droites obliques régulièrement espacées, correspondant à leurs charges électriques. La charge électrique est donc une combinaison particulière de la charge faible et de l'hypercharge, déterminée par les bosons de Higgs. En mesurant expérimentalement l'intensité de l'interaction faible, les physiciens savent que l'angle de ces droites (« l'angle de mélange faible ») est d'environ 30 degrés.

Expliquer la valeur de cet angle est l'un des principaux objectifs que doit atteindre une théorie unifiée.

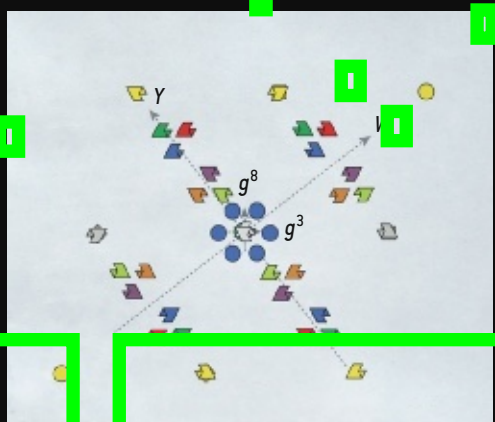
Dans le modèle standard, l'interaction forte qui lie les quarks pour former les nucléons (protons et neutrons) est associée à un groupe de Lie encore plus grand, noté SU(3). La fibre de SU(3) est un espace interne à huit dimensions composé de huit ensemble de cercles s'enroulant les uns autour des autres en un motif compliqué, ce qui se traduit par des interactions entre huit espèces de particules, analogues aux photons, nommées gluons (parce qu'ils collent les nucléons du noyau atomique comme de la glu).

La géométrie de la fibre de SU(3) est fort complexe, mais on peut la décomposer en morceaux interprétables. Elle contient notamment un tore engendré par deux cercles, non enroulés l'un autour de l'autre, correspondant à deux générateurs du groupe notés g^3 et g^8 . Les six autres générateurs s'enroulent autour de ce tore, et leurs charges résultantes forment un motif hexagonal dans le diagramme des poids.

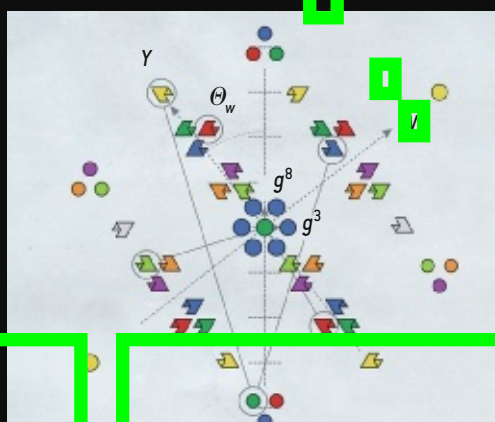
Les fibres des quarks s'enroulent autour de la fibre de ce groupe de Lie SU(3), leurs « charges fortes » formant un triangle sur le diagramme des poids. Ces charges ont été étiquetées par trois couleurs – rouge, vert et bleu. Un ensemble de fibres de matière qui forment un motif complexe,



INTERACTION FORTE : les huit gluons (six d'entre eux forment un hexagone, les deux autres se recouvrent au centre) qui transmettent l'interaction forte interagissent mutuellement et avec les quarks et les antiquarks en fonction de leurs charges fortes (g^3 et g^8). Trois quarks, un de chaque couleur, forment un motif triangulaire. Quand les particules interagissent, par exemple quand le gluon encadré interagit avec le quark vert pour produire un quark rouge, les charges doivent s'équilibrer.



MODÈLE STANDARD : il combine les diagrammes de poids des interactions électrofaibles et fortes, pour produire la meilleure théorie des interactions fondamentales disponible à ce jour. Le diagramme complet, quadridimensionnel, a été ici aplati. Toutes les particules et forces connues de la nature (hors gravitation) se trouvent sur cette figure, formant des groupes équilibrés. L'un des principaux objectifs de la physique contemporaine est d'expliquer pourquoi les particules doivent se ranger selon un tel motif.



THÉORIE DE GRANDE UNIFICATION : les physiciens sont en quête d'une théorie qui englobe et dépasse le modèle standard. Dans une telle théorie, ce qui apparaît comme des fibres multiples (pour les interactions électromagnétique, faible et forte) serait en fait différentes coupes d'une seule et même fibre. Le diagramme de poids présenté ici correspond à la théorie fondée sur le groupe $SU(5)$. Elle reproduit le modèle standard et implique l'existence de particules et phénomènes nouveaux.

comme le triangle de trois quarks, est appelé représentation du groupe de Lie $SU(3)$. Cette théorie qui décrit les interactions fortes en termes de « couleurs » est connue sous le nom de chromodynamique quantique.

À elle seule, la chromodynamique quantique et la théorie électrofaible constituent le modèle standard de la physique des particules. Le groupe de Lie du modèle standard est obtenu en combinant $SU(3)$, $SU(2)$ et $U(1)$, ainsi que les fibres de particules de matière selon plusieurs représentations. Cette structure est décrite par un diagramme des poids comportant quatre axes de charges, qui peuvent être projetés en deux dimensions et tracés. Ce diagramme est le joyau de la couronne de la physique moderne : y sont résumées toutes les interactions entre particules décrites dans le cadre du modèle standard.

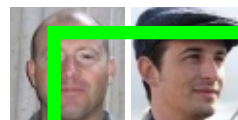
Le modèle standard : trop de questions

Si le modèle standard est un grand succès, il pose nombre d'énigmes : pourquoi la nature utilise-t-elle cette combinaison de groupes de Lie ? Pourquoi les fibres de matière ont-elles ces couleurs ? Pourquoi le

boson de Higgs existe-t-il ? Pourquoi la valeur de l'angle de mélange faible est-elle ce qu'elle est ? Comment la gravité entre-t-elle dans tout cela ? Et il y a d'autres mystères que nous n'avons pas encore abordés. Les quarks, électrons et neutrinos qui constituent la matière ordinaire forment ce qu'on appelle la première génération de fermions ; ils ont des doubles de deuxième et de troisième génération, des particules de charge identique, mais pourvues de masses beaucoup plus élevées. Pourquoi ? Et que sont la matière noire cosmique et l'énergie sombre ? Une théorie unifiée des interactions devrait être capable de répondre à ces questions et à d'autres. La première étape vers une telle théorie est l'unification des interactions forte et électrofaible.

Bien que les interactions électrofaible et forte puissent toutes deux être décrites au moyen d'espaces fibrés, leurs fibres sont distinctes. Les physiciens se sont demandé s'il n'existait pas une fibre unique qui englobât les deux. Au lieu de groupes de Lie différents pour chaque interaction, on aurait un seul groupe de Lie plus vaste, qui les contient tous. Un argument de poids va dans ce sens : à très courte distance (ou à très haute énergie), les intensités des inter-

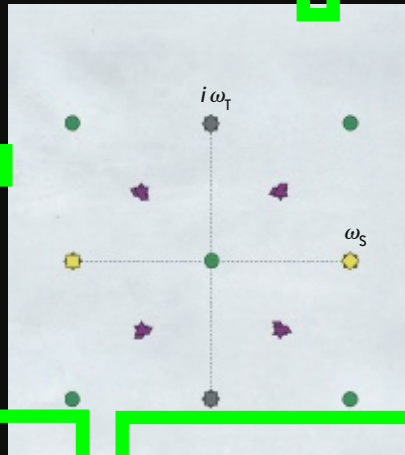
LES AUTEURS



Garrett LISI, physicien, se partage entre la recherche et le surf, et travaille à fonder un institut des sciences à Hawaii.
James Owen WEATHERALL, physicien et philosophe, se consacre actuellement à un livre sur l'histoire des idées, de la physique à la finance.



THÉORIE E6 : une façon de pousser le processus d'unification plus loin consiste à considérer que les bosons médiateurs des interactions et les particules de matière peuvent tous être associés à une fibre unique. La fibre correspondant au groupe de Lie E_6 remplit ce cahier des charges, mais la structure qui en résulte n'incorpore ni les bosons de Higgs ni l'interaction gravitationnelle.



GRAVITATION : pour l'intégrer dans le schéma d'unification, il faut tenir compte de ses « charges » caractéristiques : le spin spatial (ω_S) et le spin temporel (ω_T), liés aux translations et aux rotations. Sur le diagramme, les particules des cadrans supérieur gauche et inférieur droit se vrillent dans l'espace comme un tire-bouchon tournant à gauche.



GRAVITATION ET MODÈLE STANDARD : la combinaison des diagrammes de poids du modèle standard et de la gravitation en produit un autre qui contient toutes les particules connues. Un boson de Higgs supplémentaire apparaît dont le rôle est d'annuler les bosons de Higgs avec la gravitation. La forme spécifique du diagramme de poids combiné résulte du fait que seuls les fermions d'hélicité gauche ont une charge faible.

actions électromagnétique, faible et forte deviennent à peu près égales, ce qui suggère que l'on a affaire à différents aspects d'une même force. Une théorie de grande unification doit décrire cette force, reproduire le modèle standard et conduire à des prédictions testables.

Des théories de « grande unification »

Cette façon de faire rappelle le succès obtenu dans le passé avec le tableau périodique des éléments. Quand les chimistes ont mis au point ce tableau, ils ont commencé à anticiper les propriétés que devraient avoir les éléments qui y figuraient et à prédire l'existence possible d'éléments inconnus jusqu'alors. De même, les physiciens des particules essaient aujourd'hui de comprendre pourquoi le diagramme des poids du modèle standard présente ce motif particulier, et une fois qu'ils y seront parvenus, ils pourront expliquer les propriétés des particules connues et prédire d'éventuelles particules nouvelles.

La première tentative en vue d'une telle théorie a été proposée en 1972 par H. Georgi et Sheldon Glashow. Ces physiciens

ont remarqué que la combinaison de groupes de Lie du modèle standard constitue un sous-groupe du groupe de Lie $SU(5)$. La théorie de la grande unification fondée sur $SU(5)$ ainsi obtenue conduit à quelques prédictions spécifiques. Tout d'abord, les fermions doivent exactement les hypercharges qu'ils ont en réalité, ce qui est remarquable. Ensuite, l'angle de mélange faible devrait avoir 38 degrés, en bon accord avec l'expérience. Enfin, en plus des 12 bosons du modèle standard (8 gluons, 3 bosons faibles et le photon), 12 nouveaux bosons médiateurs de force apparaissent, nommés bosons X et Y.

C'est ces bosons X et Y qui ont mis la théorie en difficulté. Ces nouvelles particules permettraient aux protons de se désintégrer en particules plus légères, ce qui n'est pas possible dans le modèle standard. Malgré des expériences de grande ampleur, comme la traque de la désintégration du proton dans 50 000 tonnes d'eau dans une ancienne mine japonaise, la désintégration d'un proton n'a jamais été observée. Les physiciens ont dû écarteler la théorie de grande unification fondée sur $SU(5)$.

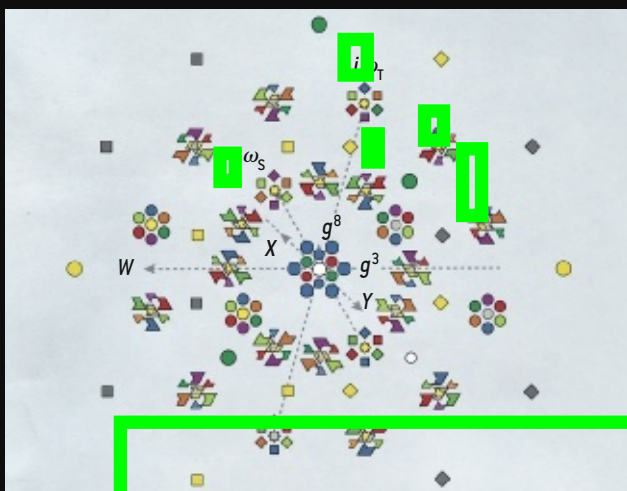
Malgré cet échec, les succès de la théorie $SU(5)$ indiquent que la voie empruntée

par H. Georgi et S. Glashow est intéressante. Une théorie de grande unification apparente, développée à peu près au même moment, est fondée sur le groupe de Lie noté $Spin(10)$. Elle fournit les mêmes valeurs des hypercharges et de l'angle de mélange faible que $SU(5)$, et prédit en outre l'existence d'une nouvelle interaction, très semblable à l'interaction faible, mais plus faible encore.

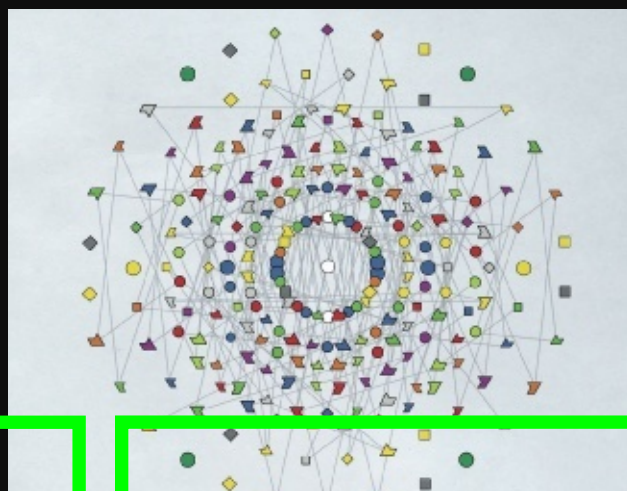
D'autres interactions ?

Les médiateurs de cette interaction plus faible sont similaires aux bosons médiateurs de l'interaction faible ; on les note W'^+, W'^- et V^3 . Ils interagissent avec les fermions d'hélicité droite, ce qui restaure ainsi la symétrie gauche-droite de l'Univers aux très courtes distances. Bien que cette théorie implique une abondance de bosons X (une bonne trentaine), elle suggère aussi que la désintégration du proton se produit à un taux inférieur à celui de la théorie $SU(5)$. Elle reste donc viable à ce jour.

Tracé d'une façon appropriée, le diagramme des poids de la théorie de grande unification fondée sur $Spin(10)$ montre que les charges des particules s'alignent en quatre cercles concentriques, un motif d'une



INTÉGRATION DANS E_8 : l'étude du diagramme de poids partiellement assemblé du modèle standard et de la gravitation montre que les charges de toutes les particules peuvent se ranger dans une structure complexe, qui correspond au groupe de Lie exceptionnel E_8 . Cette structure implique l'existence de particules exotiques, tels des fermions images des fermions existants (symbolisés en plus petit) et de nouveaux bosons médiateurs d'interactions à ce jour inconnues.



THÉORIE E_8 : l'intégration de toutes les particules dans la fibre correspondant à E_8 suggère que toutes les fibres associées à toutes les interactions et à toutes les particules connues, ainsi qu'une série de particules supplémentaires qui correspondent peut-être à la matière noire, peuvent être représentées dans ce diagramme de poids. Une symétrie, la «trialité», en relie les éléments ; elle pourrait expliquer pourquoi les fermions se présentent en trois familles. La théorie E_8 est-elle la théorie du Tout ?

rare élégance (voir l'encadré ci-dessus, à gauche). L'équilibre que présente ce diagramme a une cause profonde : le groupe de Lie $Spin(10)$, avec ses 45 bosons ainsi que sa représentation de 16 fermions et leurs 16 antiferions, font en fait partie d'un seul groupe de Lie très particulier, le groupe de Lie exceptionnel E_6 . Les «groupes exceptionnels» jouent un rôle éminent en mathématiques. Comme il n'existe qu'un nombre limité de façons d'enrouler des cercles les uns autour des autres, il n'y a qu'une poignée de types de groupes de Lie différents. Les mathématiciens ont achevé leur classification il y a un siècle. Nous en avons déjà vu deux, de types SU et $Spin$, qui se rencontrent assez souvent en physique. Et parmi les groupes de Lie, il y a cinq cas exceptionnels qui se distinguent : G_2 , F_4 , E_6 , E_7 et E_8 . Ces groupes de Lie ont des structures particulièrement complexes et des liens profonds avec de nombreux domaines des mathématiques.

Le fait que les bosons et les fermions de $Spin(10)$ et du modèle standard collent parfaitement à la structure de E_6 , avec ses 78 générateurs, est remarquable. Cela suscite une idée radicale. Jusqu'à présent, les physiciens ont toujours pensé que les bosons et les fermions étaient complètement dif-

férents. Les bosons sont représentés par des «fibres de force» laissées invariantes par les groupes de Lie associés aux interactions, tandis que les fermions sont représentés par des fibres de type différent qui s'enroulent autour des fibres bosoniques. Et si les bosons et les fermions faisaient partie d'une même fibre ? C'est ce que suggère l'intégration de la théorie $Spin(10)$ dans E_6 . La structure de E_6 inclut les deux types de particules. Autrement dit, les bosons et les fermions peuvent être combinés en tant que parties d'un compact de superconnexion, ce qui constitue une unification radicale des forces et de la matière.

Bien que cette idée ait été critiquée par plusieurs personnes, parce qu'elle combine les bosons et les fermions d'une façon qui paraît fondamentalement incohérente au premier abord, elle a un ancrage mathématique solide. Et la courbure de cette superconnexion, qui décrit l'enroulement de E_6 dans l'espace-temps, reproduit succinctement la dynamique et les interactions des bosons et des fermions dans le modèle standard. Mais E_6 n'inclut ni les bosons de Higgs ni la gravitation.

Einstein a initialement décrit la gravitationnelle comme une courbure de l'espace-temps. Son approche mathématique

était à la pointe de ce qui se faisait au début du XX^e siècle. Mais depuis, les chercheurs ont peu à peu adopté une description plus moderne de la gravitation, physiquement équivalente, mais fondée sur les espaces fibrés.

Un groupe pour la gravitation

En chaque point de l'espace-temps, on peut imaginer un référentiel, c'est-à-dire trois règles perpendiculaires et une horloge. Sans ce référentiel, l'espace-temps ne serait qu'un tissu quadridimensionnel sans notions d'orientation ni de distance. Lorsqu'on se déplace de point en point dans l'espace-temps, le jeu de règles et d'horloges varie, notre référentiel d'origine subissant une rotation. Cette rotation peut être une rotation ordinaire dans l'espace ou bien, puisqu'Einstein a montré que l'espace et le temps sont unifiés, une rotation de l'espace dans le temps. La manière dont le référentiel effectue sa rotation de point en point est déterminée par la «connexion spinorielle», plus connue sous le nom de champ gravitationnel.

Le groupe de transformations géométriques en trois dimensions d'espace et une

Une théorie prometteuse et controversée

Le groupe de Lie E_8, dont Garre... groupe d'unification, fascine les physiciens depuis longtemps. Ainsi, dans l'une des théories des cordes (la théorie des cordes hétérotiques), une version fait jouer le rôle de groupe de symétrie la jauge à la combinaison E_8. Le groupe E_8 apparaît aussi dans les réductions dimensionnelles des théories dites "supergravité", qui sont les limites à basse énergie des théories des cordes. De façon plus générale, le groupe E_8 est considéré comme un groupe prometteur en physique des particules. En effet... G. Lisi, il contient d'une façon naturelle une série de sous-groupes... dans le cadre des théories de grande unification. Cette idée si l'on utilise le symbole d'in-	clusion C... peut se résumer par $U(1) \times SU(3) \times SU(3) \subset SU(5) \times SO(10) \subset E_8.$ La proposition faite par G. Lisi en 2007 dans un article mis en ligne, très médiatisé, s'inscrit donc dans cette dernière mouvance, mais en utilisant une formulation plus simple : « Les symétries de l'espace-temps (c'est-à-dire le groupe de Lorentz) et la symétrie de couleur (c'est-à-dire le groupe $SU(3)$) sont contenues dans le groupe E_8. » Pour autant, la théorie prometteuse promue par G. Lisi doit encore franchir nombre d'épreuves avant de pouvoir être considérée comme une al- ternative à l'une des théories des cordes. Parmi elles, on notera notamment que : « La théorie ne pré- plique pas l'asymétrie gauche-droite des leptons (c'est-à-dire pourquoi seules les par-	culs dont le spin est aligné sur la vitesse (hélicité gauche) interagissent. Ce phénomène a une traduction expérimentale connue sous le nom de violation de la parité. — cette théorie annonce l'existence de fermions miroirs (aux nombres quantiques opposés) encore inconnus, ainsi que nombre de nouvelles particules et interactions, et il faut soit les découvrir, soit expliquer leur invisibilité. — la dynamique quantique, c'est-à-dire l'évolution des champs quantiques associés aux particules et aux interactions décrite par les équations de la théorie n'est pas com- tant entrer en conflit avec un théorème général de la physique des particules. Emilian Dudas, CNRS-École polytechnique Palaiseau
---	---	--

de temps est $Spin(1, 3)$ – c'est le groupe de Lie de la gravitation. Nous ressentons la force de gravité parce que le champ de connexion spinorielle fait tourner notre référentiel quand nous nous déplaçons dans le temps, ce qui nous attire vers le centre de la

Des charges de spin

De même que les particules ont différents types de charge décrivant comment elles interagissent *via* les forces du modèle standard, elles ont un type de charge décrivant comment elles se comportent dans l'espace. Considérons ce qui se passe lorsqu'on fait tourner une règle de 360 degrés dans l'espace : elle revient à son état de départ. Cette règle (et le référentiel) a une charge de spin spatial égale à +1 ou -1. Mais si nous faisons tourner de 360 degrés dans l'espace un fermion tel qu'un électron, il ne revient pas dans son état initial. Pour ce faire, on doit le faire tourner de 720 degrés : l'électron a une charge de spin de +1/2 ou -1/2.

La charge de spin joue un rôle en gravitation. Plus précisément, l'interaction médiane du référentiel et de la con-

exion spinorielle, est liée à la géométrie de l'espace-temps. Comme nous l'avons fait pour les autres interactions, nous pouvons tracer un diagramme des poids pour la gravitation fondée sur le spin (voir le diagramme correspondant page 74). La charge de spin spatial d'une particule est son moment cinétique intrinsèque, et sa charge de spin temporel est liée à son mouvement dans l'espace. Les fermions dont le spin spatial et le mouvement sont alignés (*représentés en haut à droite et en bas à gauche du diagramme*) décrivent un tire-bouchon d'hélicité droite en se déplaçant dans l'espace. Les fermions avec un mouvement et un spin spatial de sens opposés sont d'hélicité gauche.

Ce qui est étrange, c'est que la charge de spin a aussi une pertinence inattendue pour l'interaction faible. Seules les particules d'hélicité gauche et les antiparticules d'hélicité droite ont une charge faible et sont soumises à l'interaction faible. Le fait que l'interaction faible soit sensible à la charge de spin suggère que la gravité et les autres forces, pour différentes qu'elles paraissent de l'extérieur, pourraient bien en fait être profondément liées.

Il n'y a maintenant plus qu'à mettre les morceaux ensemble. Avec la gravité décrite par $Spin(1, 3)$ et la théorie de grande unification privilégiée décrite par $Spin(10)$, il est naturel de les combiner en un unique groupe de Lie, $Spin(11, 3)$. Cela débouche sur une théorie gravitationnelle de grande unification, qu'ont introduite en 2010 Roberto Percacci, de l'École internationale d'études avancées de Trieste en Italie, et Fabrizio Nesti, de l'Université de Ferrare. C'est un pas important sur la voie d'une théorie complète du Tout.

La théorie fondée sur le groupe $Spin(11, 3)$ inclut des blocs de 64 fermions et prédit leur spin ainsi que leurs charges électrofaible et forte. Elle inclut aussi un ensemble de bosons de Higgs. La courbure de l'espace fibré $Spin(11, 3)$ décrit correctement la dynamique de la gravité, les autres interactions et les bosons de Higgs. Elle inclut même une constante cosmologique qui explique l'énergie sombre et l'expansion de l'univers. Tout s'éclaire.

L'espace-temps né d'une symétrie brisée ?

Les sceptiques ont objecté qu'une telle théorie devrait être impossible. Elle semble violer un théorème de la physique des particules, le théorème de Coleman-Mandula, qui interdit de combiner la gravité avec les autres interactions en un seul et même groupe de Lie. Mais le théorème a une faille importante : il ne s'applique que lorsque l'espace-temps existe. Dans la théorie $Spin(11, 3)$ (et dans la théorie E_8), la gravité n'est unifiée avec les autres interactions qu'avant la brisure de symétrie du groupe de Lie complet, et à ce stade, l'espace-temps n'existe pas encore. Notre univers commence quand la symétrie se brise, une direction particulière devenant privilégiée dans le groupe de Lie unificateur. À cet instant, la gravitation devient une force indépendante, et l'espace-temps émerge soudain. Ainsi, le théorème reste satisfait. L'avènement du temps correspond ainsi à la brisure d'une symétrie parfaite.

Le diagramme des poids de la théorie $Spin(11, 3)$ est finement structuré et équilibré. Sa symétrie, comme celle de la théorie de grande unification fondée sur $Spin(10)$, pointe vers des structures mathématiques plus profondes. Ce motif élégant de particules fait p...

être la structure la plus belle de toutes les mathématiques, le plus grand groupe de Lie exceptionnel simple, E_8 .

De la même façon que E_6 contient la structure de la théorie de grande unification $\text{Spin}(10)$, avec ses 16 fermions, le groupe E_8 contient la structure de la théorie gravitationnelle de grande unification $\text{Spin}(11, 3)$ avec ses 64 fermions, spins compris. Ainsi, la gravité et les autres forces connues, les bosons de Higgs et une génération de fermions du modèle standard font tous partie du champ de superconnexion unifié d'un espace fibré E_8 .

Un chantier inachevé

Le groupe E_8 , avec ses 248 générateurs, a une structure riche et complexe (voir le schéma correspondant page 75). En plus de la gravité et des particules du modèle standard, E_8 inclut de nombreuses autres particules, dont certaines pourraient expliquer la matière noire cosmique, et d'autres qui pourraient rendre compte des particules des deuxième et troisième générations du modèle standard.

Cette nouvelle théorie fondée sur E_8 , groupe sur lequel plusieurs physiciens travaillent, est prometteuse, mais il reste beaucoup de travail à faire. Nous devons comprendre comment trois générations de fermions émergent, comment ils se mélangent et interagissent avec les bosons de Higgs pour acquérir leur masse, et exactement comment la théorie E_8 fonctionne dans le contexte de la théorie quantique.

Si la théorie E_8 est correcte, il est vraisemblable que le LHC détectera certaines des particules prédites. Mais si ce collisionneur détecte des particules qui ne correspondent pas au motif de E_8 , cela pourrait porter un coup fatal à la théorie. Dans un cas comme dans l'autre, les mêmes outils géométriques utilisés pour développer la théorie E_8 seront utiles pour comprendre les résultats du collisionneur. Toute particule que les expérimentateurs découvriront prendra sa place dans un diagramme de poids, et nous rapprochera un peu plus de la structure géométrique profonde de la nature. Et que la théorie E_8 soit la bonne ou pas, elle nous aura fait quand même progresser vers la théorie du Tout. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Gilmore, *Lie Groups, Physics, and Geometry*, Cambridge University Press, 2008.

A. G. Lisi, *The beauty of particle physics*, www.ted.com/index.php/talks/garrett_lisi_on_his_theory_of_everything.html.

A. G. Lisi, *An exceptionally simple theory of everything*, <http://arxiv.org/abs/0711.0270>.

L. Smolin, *Les atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, 2000.

H. Bernstein et A. Phillips, *Les espaces fibrés et la théorie quantique*, *Pour la Science*, n° 47, 1981.

H. Georgi, *Une théorie unifiée des particules élémentaires et des interactions*, *Pour la Science*, n° 44, 1981.



le collège
universcience
à la Cité des sciences et de l'industrie

Conférences
Le mardi à 18 h 30

Les deux infinis

Entre l'infiniment petit et l'infiniment grand, physiciens des particules et cosmologistes travaillent désormais la main dans la main pour mieux comprendre la matière et l'Univers. Quatre d'entre eux nous expliquent pourquoi et comment.

1^{er} mars
Dans l'immensité du cosmos
Jean-Loup Puget, astrophysicien, directeur de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences.

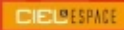
8 mars
Au plus intime de la matière
Michel Davier, physicien, professeur à l'université Paris-Sud Orsay, membre de l'Académie des sciences.

15 mars
L'infiniment petit, clé de l'Univers ?
Pierre Binétruy, directeur du laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC), CNRS-université Paris-Diderot.

22 mars
Le LHC, projection dans les infinis
Michel Spiro, président du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN).

universcience.fr

Avec le soutien de







Le bananier, un enjeu mondial

André Lassoudière

Le bananier est l'une des principales ressources alimentaires de la planète. Depuis une vingtaine d'années, une agriculture raisonnée et durable de la banane est mise en place pour répondre à des besoins toujours croissants.

« On ne fait pas que manger, produit de l'alcool, des médicaments, du papier, de la corde, de la ficelle, du fil, des objets artistiques variés, des parapluies, des assiettes "biologiques" jetables, des contenants à cuisson, de la colle, de la teinture, du savon... » Comme le souligne ce slogan du Réseau international d'amélioration de la banane et de la banane plantain (INIBAP), le bananier est une plante dont chaque élément est utilisé. En Inde, le cultivar Kalpatharu (un cultivar est une variété obtenue à partir d'une sélection dans un champ) en est un exemple : le fruit est consommé en dessert et préparations culinaires ; les feuilles servent d'assiette ; le bourgeon mâle est cuit comme un légume, les racines servent en décoction médicinale, et les animaux mangent diverses parties de la plante. La sève est utilisée comme encre indélébile, les résidus de culture en compost. Les feuilles servent aussi à réaliser des produits artisanaux. Et de nouveaux usages apparaissent encore : les fibres de la tige sont un absorbant de haute porosité et capillarité, dont on développe l'utilisation dans des systèmes naturels de purification de l'eau ou pour l'absorption de l'huile.

Après le riz, le blé et le maïs, la banane est l'une des plus importantes cultures

L'ESSENTIEL

- ✓ On produit plus de 116 millions de tonnes de bananes par an.
 - ✓ Entre 1890 et 1990, leur culture intensive, couplée à l'usage croissant de pesticides, a dégradé l'environnement et favorisé la résistance des parasites.
 - ✓ Depuis 20 ans, biologistes et agriculteurs élaborent des stratégies de culture bananière plus respectueuses des sols et des organismes.
 - ✓ Ils cherchent notamment à maintenir une diversité indispensable pour la lutte contre les parasites, mais peu favorisée par la nature.
- Le bananier est une herbe qui se multiplie par rejets identiques au pied-mère.**

Sauf mention contraire, les figures sont de A. Lassoudière

vivrières par le monde ; 90 pour cent de la production sont consommés sur place, notamment dans les pays les plus pauvres d'Afrique, d'Amérique latine et d'Asie. Dans certaines régions, la banane est même la base de l'alimentation humaine depuis des siècles. Elle a fait son apparition dans la consommation des régions tempérées beaucoup plus récemment – vers 1870 en Amérique et en Europe. Le commerce international s'est accéléré au début du XX^e siècle, avec le développement du transport maritime réfrigéré.

Pour répondre à des besoins toujours croissants, le marché de la banane a connu une expansion considérable, entraînant une culture intensive, peu soucieuse de l'environnement. Vers 1990, nous allons le voir, le constat était désastreux : dégradation des sols, pollution de l'eau, impact sur la santé... Mais depuis, s'inspirant des propriétés de cette plante étonnante – c'est une herbe géante qui produit des fruits généralement sans graines –, les chercheurs et les producteurs de différentes régions (de Martinique et de Guadeloupe, notamment) mettent au point de nouvelles stratégies favorisant une culture raisonnée, tout aussi productive, mais respectueuse de l'environnement. Ce sont ces stratégies que nous présentons ici.



1. L'INFLORESCENCE du bananier présente deux parties : les fleurs femelles, précoces, donnent les bananes [en haut], puis suivent les fleurs mâles (ici, elles sont déjà tombées, et il ne reste que la tige dénudée), produites par le bourgeon terminal [ci-contre].

Mais auparavant, examinons de plus près cette plante surprenante et les contraintes liées à sa culture.

Le bananier est probablement la plus grande herbe du monde, une espèce (*Musa ingens*) pouvant atteindre 15 mètres de hauteur. Le « faux-tronc » est formé de gaines de feuilles imbriquées (voir l'encadré page 80). L'inflorescence – la tige qui porte les fleurs – prend naissance dans la souche et progresse au centre du faux-tronc avant d'être visible au milieu du bouquet de feuilles. Sur cette inflorescence, les fleurs les plus précoces sont femelles et leurs ovaires donnent les fruits, l'ensemble constituant le régime de banane. Si les espèces sauvages de bananier sont séminifères (les bananes portent des graines), chez la majorité des cultivars, les fruits obtenus sont sans graines (aspermes). En outre, les ovaires de leurs fleurs femelles se développent généralement sans fécondation (fruits dits parthénocarpiques), alors que dans la plupart des espèces sauvages, ils doivent être fécondés pour se transformer en fruits. Les fleurs suivantes sont mâles. Chaque pseudotronc donne une inflorescence unique, puis meurt. La pérennité de la plante est assurée par voie végétative : les ramifications latérales (rejets) prenant la place du pied-mère.

Une herbe domestiquée très tôt

Le bananier est l'une des plantes les plus anciennement cultivées. Les premiers vestiges horticoles découverts en Papouasie-Nouvelle-Guinée datent d'environ 10 000 ans. La première domestication des bananiers sauvages – à graines – s'est faite par sélection d'hybrides portant de gros régimes : les espèces sauvages se sont croisées naturellement (le pollen des fleurs mâles d'une espèce a fécondé les graines des bananes d'une autre espèce, lesquelles, après la chute du fruit, ont pris racine et donné de nouvelles variétés hybrides), et les hommes ont cultivé ces hybrides qui donnaient beaucoup de fruits (voir l'encadré page 83). Les fruits de ces premiers cultivars avaient peu de graines – et étaient donc stériles –, mais une pulpe abondante. De l'Asie méridionale aux Philippines, les peuples « primitifs » ont utilisé très tôt les bananiers, même séminifères. Leurs graines étant dures et non comestibles, ils auraient cultivé les bananiers pour consommer les parties les plus tendres, telles que les bourgeons et le cœur des jeunes troncs.

LE BANANIER, UNE HERBE GÉANTE

Le bananier se compose d'une tige souterraine d'où partent des racines à sa base et de larges feuilles à son sommet; elle donne naissance à une unique inflorescence, le régime. Des ramifications latérales (rejets ou jets) sont produites par la tige.

Le bourgeon terminal de la tige produit des feuilles, qui apparaissent successivement en position hélicoïdale, au sommet de la tige. Leurs bases (gainnes foliaires), très développées, sont solidement imbriquées, formant

Feuille adulte
Longue et large aux limbes déchiquetés.

Feuille naissante

Feuille naissante

Régime

Jusqu'à 15 grappes (mains) de bananes peuvent se développer à partir des fleurs femelles.

Rachis de l'inflorescence
Entre les fruits et le bourgeon, les fleurs mâles tombées laissent une tige dénudée.

Bourgeon terminal
Une de ses bractées se soulève, découvrant une main de fleurs mâles (non représentée).

Faux-tronc
Gainnes foliaires imbriquées avec, au centre, la tige de l'inflorescence.

Rejet de la 4^e génération

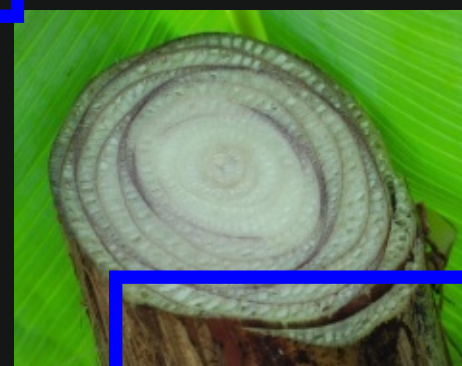
Rejet petit-fils

Rejet fils

Pied-mère

Souche

Racines
Elles bourgeonnent de la souche par deux, trois ou quatre.



Le faux-tronc est constitué des gainnes foliaires imbriquées, ce qui assure sa rigueur. Ces gainnes sont constituées de deux parois (parenchymes) parcourues de canaux de sève et de latex, séparées par de petits espaces lacunaires cloisonnés.

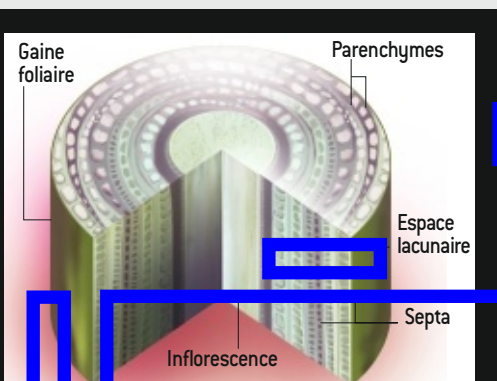
un faux-tronc. La tige de la souche ne contiennent de lignine, de sorte que le faux-tronc n'est pas en bois : c'est pourquoi le bananier est une herbe et non un arbre.

Après deux à trois mois, le bourgeon terminal de la tige cesse de produire des feuilles et déclenche la formation de l'inflorescence. Quelques semaines après, la tige de l'inflorescence (le faux-tronc) se casse à l'intérieur du faux-tronc, tandis que la jeune inflorescence se développe et grossit, pour apparaître au sommet du faux-tronc.

L'inflorescence s'épanouit alors en plusieurs stades, en se recourbant vers le sol. Les fleurs sont groupées par ensembles de deux rangées serrées, chacun étant protégé par une bractée. Les premiers groupes qui se différencient sont constitués de fleurs femelles, dont l'ovaire se termine par des étamines (organe reproducteur mâle), mais, dans la plupart des variétés, l'ovaire se transforme en fruit sans fécondation.

Cinq à quinze groupes de fleurs femelles se développent ainsi, appelés mains de bananes. Les groupes suivants sont composés de fleurs mâles stériles, c'est-à-dire dont l'ovaire, atrophié, ne donne pas de fruit : les bractées se soulèvent une à une, se replient et tombent, découvrant les mains de fleurs mâles. Les jeunes bananes, qui pointent d'abord vers le bas, se redressent en quelques jours, s'allongent et s'épaississent. Il leur faudra environ dix semaines pour atteindre leur taille définitive. À l'extrémité de l'axe floral, le bourgeon terminal continue à produire des mains de fleurs mâles, jusqu'à la fin de la récolte. Trois jours après la récolte, l'espace dénudé entre le régime (la partie de l'inflorescence qui porte les bananes) et le bourgeon terminal se remplit de nouvelles fleurs mâles.

La récolte met fin à l'existence du bananier. Plusieurs rejets se développent à leur tour, permettant la pérennité de la culture.



Elles forment des réservoirs d'eau pouvant contenir jusqu'à 1,5 litre pour 100 grammes de matière sèche. Les cloisons (septa) participent à la circulation de l'eau et à la rigidité de chaque feuille en évitant son écrasement.

L'évolution des espèces séminifères sauvages vers les cultivars s'est probablement faite par étapes : des hybridations naturelles ont diversifié les variétés. Parmi elles, certaines ont accumulé des facteurs de stérilité (disparition des graines) et sont devenues polyploïdes : au lieu de contenir deux exemplaires de chromosomes (variétés diploïdes), leurs cellules en contiennent trois (variétés triploïdes) ou plus, ce qui a augmenté leur taille, et donc celle des régimes. Certaines de ces variétés ont en outre acquis la capacité de produire des fruits sans fécondation des fleurs femelles. La sélection humaine a complété ce processus naturel. La connaissance des voies, périodes et moyens de dispersion est très utile pour comprendre les parentés génétiques, mais aussi les concomitances avec la dispersion du parasitisme.

Un siècle de culture intensive

La production de bananes a dépassé largement 100 millions de tonnes par an depuis 2005 (116,5 millions en 2008). Les surfaces consacrées à cette culture sont proches de dix millions d'hectares, principalement réparties dans les régions tropicales : Asie, Amérique du Sud et centrale, Afrique centrale (en 2005, les cinq premiers pays producteurs étaient l'Inde, l'Ouganda, l'Équateur, le Brésil et la Chine). On distingue les variétés dont les fruits sont consommés comme dessert de celles de bananes plantains et bananes à cuire – les bananes légume. Les bananes dessert représentent près de 60 pour cent de la production mondiale et font l'objet d'un commerce international très développé (17,3 millions de tonnes en 2008, soit environ un tiers de la production). Leur production a plus que triplé en 40 ans. Il en existe de très nombreuses variétés, mais, depuis le début des années 1960, le sous-groupe Cavendish (Grande Naine) est le plus cultivé, avec plus de 56,6 millions de tonnes produites ; ce sous-groupe représente plus de 97 pour cent du commerce international. La consommation annuelle par habitant en 2008 était de 6 kilogrammes en Russie, 9 au Japon et aux États-Unis et 11 dans l'Union européenne.

Les bananes légume représentent environ 40 pour cent de la production totale. Les plantains (18 millions de tonnes en 2008) sont moins cultivées que les autres bananes à cuire (29,3 millions de tonnes). En fait, 98,5 pour cent sont consommés directement

dans les pays qui les produisent ; une très faible proportion est exportée (environ 690 000 tonnes). Ces bananes légume, probablement sélectionnées avant la banane dessert pour leur apport énergétique, participent à l'alimentation de base de millions d'êtres humains dans les régions tropicales humides : en 2008, par exemple, leur consommation dépasse 50 kilogrammes par an et par habitant en Côte d'Ivoire, au Costa Rica, aux Philippines et en Océanie et atteint 160 kilogrammes à Sainte-Lucie, en Ouganda ou au Samoa. Les variétés sont nombreuses et parfois liées à une utilisation particulière, telle la fabrication de bière et de vin en Afrique de l'Est.

Entre 1890 et 1990, la production bananière par hectare et par an, destinée à l'exportation, a été multipliée par cinq, passant de 15 à 70 tonnes, et la quantité prête à la commercialisation est passée de 7 à

50 tonnes. Le système de culture est devenu de plus en plus intensif, avec de graves conséquences sur l'environnement.

Entre 1870 et 1900, la mise en place de grandes surfaces de culture nécessita une multiplication intensive de bananiers provenant d'Asie du Sud-Est. Leurs prédateurs et diverses maladies n'ont pas tardé à se manifester. C'est ainsi que les bananeraies de Jamaïque et d'Amérique plantées avec le cultivar Gros Michel furent contaminées par la maladie de Panama, due à un champignon parasite (*Fusarium oxysporum f.sp. cubense*). La maladie provoqua une rapide disparition des plants atteints et s'étendit sur le continent américain. Rien qu'en Amérique centrale et du Sud, entre 1910 et 1960, plus de 15 000 hectares ont été détruits. Ce désastre marqua le début d'une collaboration étroite entre la recherche et la production : la maladie de Panama inaugura la recherche bananière à grande échelle.

Cependant, aucune lutte chimique ou physique ne fut efficace. Un programme de création d'une variété résistante dérivée de Gros Michel fut initié, mais sans résultat probant, si bien qu'un changement de variété fut mis en place à grande échelle : Gros Michel fut remplacé par des variétés très peu sensibles à la maladie de Panama, tel le sous-groupe Cavendish, mais plus exigeant. Ainsi, à partir de 1960, toutes les plantations dans tous les pays utilisaient la Grande Naine, dans un système unique de culture toujours plus intensif avec un conditionnement des fruits en cartons.

Jusqu'en 1990, on a surtout cherché la meilleure rentabilité économique, sans trop

L'AUTEUR



André LASSOUDIÈRE a été ingénieur agronome au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) de 1967 à 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- A. Lassoudière, Histoire de la culture bananière [de la fin du XVIII^e au début du XXI^e siècle], L'importance de la recherche dans l'histoire de la production bananière d'exportation, QUÉ, 2004.
- A. Lassoudière, L'histoire du bananier, QUÉ, 2010.
- J. M. Risède et al., Challenging short and mid-term strategies to reduce the use of pesticides in banana production, dans From Science to Field, Banana Case Study, Guide 14, FAO, 2010.
- A. Lassoudière, Le bananier et sa culture, QUÉ, 2007.
- K. Tomekpe, Revue des stratégies d'amélioration conventionnelle de *Musa*, *Infamusa*, vol. 13, n° 2, pp. 2-6, 2000.

se soucier des conséquences éventuelles à moyen et long termes sur l'environnement et la santé. Les traitements pesticides étaient largement utilisés. D'autant qu'outre le *Fusarium* et la maladie de Panama, d'autres parasites envahissaient les cultures bananières : depuis 1936, un champignon, *Mycosphaerella musicola*, détruisait les feuilles, provoquant la cercosporiose jaune ou maladie de Sigatoka; depuis 1945, les larves du charançon fragilisaient les souches en y creusant des galeries et, depuis 1954, des vers microscopiques, les nématodes, tel *Radophylus similis*, l'espèce la plus dangereuse pour le bananier, s'étaient attaqués aux racines (voir la figure 2).

Pour lutter contre la cercosporiose jaune, on pulvérisait en quantité des solutions à base de cuivre (bouillie bordelaise), avec des pertes de rendement et de qualité importantes. En 1955, des chercheurs français mirent au point une méthode de traitement aux huiles minérales légères. À peine pensait-on dominer la maladie qu'une nouvelle forme plus pathogène apparaissait dans les années 1960 : la maladie des raies noires ou cercosporiose noire, causée par un autre champignon, *Mycosphaerella fijiensis*. Cette maladie atteint le feuillage non seulement des variétés commerciales déjà sensibles à la forme jaune, tel le sous-groupe Cavendish, mais aussi d'un grand nombre de cultivars vivriers qui y résistaient. Elle mettait donc en danger les moyens de subsistance de nombreuses populations rurales. Pour contrer ce nouveau fléau, on appliqua sur certaines cultures jusqu'à 50 traitements par an en Amérique centrale (contre 22 à 25 pour traiter la cercosporiose jaune).

La lutte contre le charançon noir du bananier (*Cosmopolites sordidus*) a été assurée de 1954 à 1992 par des insecticides orga-

nochlorés puissants, mais souvent toxiques pour la faune et l'environnement : l'hexachlorocyclohexane (HCH) jusqu'en 1973, puis le chlordecone (Kepone, Curlone) de 1974 à 1992. Depuis, avec la découverte d'une phéromone spécifique du charançon, la sordidine, on est revenu au piégeage : attirés par la sordidine, les charançons se noient dans un bac d'eau.

Des pathogènes du charançon – dont le nématode *Steinernema carpocapsae* – s'étaient révélés efficaces en laboratoire, mais sur le terrain les résultats étaient peu concluants. Depuis quelques années, cependant, l'idée de combiner l'attraction par des phéromones et l'infection par des nématodes fait son chemin et permet d'envisager une lutte sans insecticide. Dans le bac, on remplace l'eau par des larves d'un papillon facile à élever (*Galleria mellonella*), inoculées par le nématode. Attirés dans le bac par la sordidine, les charançons sont infectés par les nématodes après quelques minutes de contact avec les larves et, de retour dans la nature, ils contaminent leurs congénères. Les charançons infectés meurent. Ce piégeage, associé à des systèmes de culture adaptés, est un des défis du début du XXI^e siècle.

La lutte contre les nématodes fut assurée par la irrigation du sol au dibromochloropropène (Némagon) de 1950 à 1970, puis à l'aide de nématicides appliqués plusieurs fois par an en fonction du nombre de nématodes dans les racines.

L'impact sur l'environnement

C'est à partir de la fin des années 1980 que les conséquences de l'utilisation de tous ces pesticides sur la qualité des ressources en eau et la santé humaine ont été



2. LES DÉGÂTS causés par les trois principaux parasites du bananier. Les larves de charançon creusent des galeries dans la souche (a); les nématodes détruisent les racines (b). Fragilisé dans les deux cas, le bananier

verse alors au moindre coup de vent. Enfin, les champignons responsables des cercosporioses endommagent les feuilles, diminuant leur surface, ce qui réduit les capacités de photosynthèse, donc le rendement (c).

LES BASES GÉNÉTIQUES DU BANANIER

Dans la culture bananière, tout programme de création variétale par hybridation impose au minimum deux étapes : au départ, il faut sélectionner une variété fertile, c'est-à-dire dont les fruits portent des graines, que l'on fécondera avec le pollen des fleurs d'une autre variété ; on cherche à obtenir une variété stérile (sans graines) et parthénocarpique (qui n'a pas besoin d'être fécondée pour donner des fruits), pour avoir des fruits pulpeux et plus gros. Pour cela, il faut avoir une bonne connaissance des propriétés génétiques des Musacées – les bananiers – est nécessaire.

La famille des Musacées comporte trois genres, *Ensete*, *Musa* et *Musella*, correspondant à près de 50 espèces et plus de 1 000 variétés. La quasi-totalité des variétés cultivées présentent trois copies de leurs chromosomes (triploïdes) et sont parthénocarpiques sans graines. Elles ont pour ancêtres deux espèces sauvages diploïdes séminifères de la section des *Eumusa* (genre *Musa*) : *Musa acuminata* Colla et *Musa balbisiana* Colla. Les formes sauvages de *Musa acuminata* ont subi de nombreuses variations de forme et de longueur des régimes et des fruits. La

sii est à l'origine de la plupart des variétés cultivées aujourd'hui ; c'est la seule qui présente des signes de parthénocarpie. *Musa balbisiana* (qui n'a pas de sous-espèce) est très vigoureuse et manifeste des résistances très fortes aux maladies. Une stratégie d'hybridation consiste à partir d'une de ces variétés séminifères.

La stérilité des variétés (ou parfois une faible fertilité) peut résulter de diverses causes. Elle peut être le fruit d'une particularité génétique : hormis dans les plantes sauvages, la méiose – division cellulaire qui donne les ovules (les graines de la banane) – se déroule rarement normalement, entraînant la formation de cellules contenant un génome variable. La stérilité peut aussi résulter de fortes mutations, chez *Musa acuminata*, ou de la séquence des gènes homologues situés sur deux exemplaires du chromosome. Enfin, elle peut être due au mélange des espèces *acuminata*/*balbisiana* ou à la polypléidie. La parthénocarpie, quant à elle, est indépendante de la stérilité : elle a besoin d'une stimulation pour parvenir. Elle constitue un avantage sélectif, car les fruits sont plus gros

Pour tout programme de création variétale, il importe de disposer d'une diversité génétique la plus large possible : cette diversité est capitale dans le développement de nouveaux hybrides résistant au parasite. La diversification qualitative de la production est d'autant plus importante que les variétés, par rejets, tous génétiquement identiques de génération en génération : contre un parasite, ces « clo-

nes » sont vouées à disparaître. Aujourd'hui, les boutures d'une grande partie des variétés existantes sont conservées au froid, dans une collection internationale de matériel génétique de *Musa* rassemblée à l'Institut catholique de Louvain, en Belgique, en association avec *Biodiversity International*. Les grandes variétés sont indispensables pour les programmes d'amélioration génétiques et les études taxonomiques.



ENTRETIEN DU BANANIER : après avoir supprimé, sur le bananier séminifère, les étamines (organes de reproduction mâles) des fleurs avant leur éclosion, on féconde les fleurs femelles avec les étamines d'un bananier d'une autre variété (voir ci-dessus).

dénoncées. En 2010, le réseau européen pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement (ENDURE) a donné une estimation des quantités de pesticides utilisées dans divers pays exportateurs en 2006-2007 (voir la figure 4).

Parmi eux, les nématicides et les insecticides sont les plus dangereux. La Guadeloupe et la Martinique ont considérablement réduit l'utilisation de ces pesticides en quelques années : trois kilogrammes par hectare et par an de substances actives, contre dix kilogrammes en 1998, soit une réduction de 50 pour cent en huit ans, avec un rendement passant de 40 à plus de 50 tonnes à l'hectare. Ce résultat a été obtenu en partie grâce à la mise en œuvre de nouvelles pratiques culturales et méthodes de lutte développées par les chercheurs en partenariat avec les producteurs, sur lesquelles nous reviendrons. Mais d'autres pays (comme le Costa Rica) ont

Costa Rica, les évaluations ont été de 12 kilogrammes par hectare et par an en 1998, de 18 à 24 kilogrammes en 2003, et de 20 kilogrammes en 2006.

L'utilisation de fongicides pour combattre les cercosporioses, quant à elle, varie selon les conditions climatiques, la prédominance de la maladie des raies noires et le développement de résistances. En 2006, en Côte d'Ivoire, on en utilisait ainsi 4 kilogrammes par hectare, contre 42 kilogrammes au Costa Rica, du fait de la différence de climat et de la stratégie de traitement (les champignons parasites ont développé peu de résistances en Côte d'Ivoire, contrairement à ceux du Costa Rica).

En Martinique, touchée par la cercosporiose jaune, la charge de fongicide est inférieure à un kilogramme de matière active par hectare et par an. Mais la cercosporiose noire est apparue sur le territoire en septembre 2010, ce qui est très préoccupant à court terme.

Les nuisances liées à l'usage des fongicides sont notables (pollution des eaux), mais faibles devant celles entraînées par les nématicides et insecticides. La réglementation européenne interdit maintenant les traitements à moins de 50 mètres des habitations et des cours d'eau. La seule solution est la mise en culture de variétés tolérantes obtenues par sélection génétique.

Le contrôle des « mauvaises herbes », enfin, est réalisé par des herbicides (trois à huit kilogrammes par hectare et par an). Leur utilisation tend cependant à se limiter à un seul passage du fait de l'amélioration des pratiques culturales : on maintient un couvert végétal plus homogène dans le temps et l'espace (entre deux périodes de culture bananière, on cultive une autre plante), on utilise du mulch lorsque l'on replante les bananiers – trois matériaux disposés au pied des plants pour



3. VITROPLANTS DE BANANIER cultivés en pépinière (en vert) après production en laboratoire, puis plantés en sol sain (en jaune, 12 mois après la plantation).

empêcher la croissance des mauvaises herbes –, on crée les plantes des jachères en cours de végétation pour nettoyer les champs. Actuellement, la recherche finalise l'utilisation de plantes « de service » qui, cultivées en même temps que le bananier, couvrent le sol en limitant le développement des mauvaises herbes.

Des plants sains sur un sol sain

Depuis 1995, dans plusieurs régions telles la Martinique, la Guadeloupe et certaines contrées du Cameroun et de la Côte d'Ivoire, la replantation des bananiers avec des vitroplants sélectionnés – des rejets « propres » cultivés hors sol – sur des terrains assainis par des jachères enherbées ou des rotations culturales a permis de rompre cette escalade de pesticides contre les nématodes et les charançons, tout en diminuant la fréquence des replantations et en améliorant les rendements. La replantation se fait en deux étapes. Après la cueillette des bananes, on crée un « vide sanitaire » on détruit totalement l'ancienne bananeraie de façon qu'aucune repousse de bananier ne subsiste, ce qui tend à éliminer les nématodes et les larves de charançon. Puis on pratique une jachère ou une rotation culturale, ce qui enrichit la terre. Et finalement, on combinant cette pratique à la sélection de variétés de bananier résistantes. Les agriculteurs ont ainsi passé d'obtenir des bananes saines, de

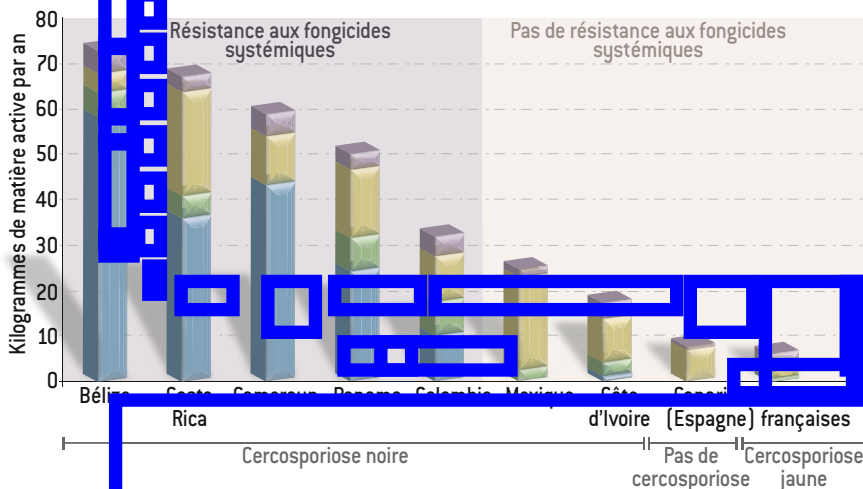
meilleure qualité, et produites dans des conditions qui préservent l'environnement et la santé humaine.

L'idée d'hybridation n'est pas récente. Dès 1912, un programme de création d'hybrides était initié en Jamaïque et à Trinidad pour créer des variétés résistant à la maladie de Panama. Des hybrides tétraploïdes (dont les cellules ont quatre exemplaires de leurs chromosomes) de Gros Michel et de l'espèce sauvage séminifère *Musa acuminata* avaient ainsi été obtenus, résistants à la maladie de Panama, mais dépourvus des qualités commerciales indispensables (voir l'encadré page 83). À la fin des années 1970, l'expansion rapide de la maladie des raies noires a contraint les producteurs à lancer ces recherches à l'échelle mondiale. Depuis les années 1990, les variétés résistantes ou tolérantes aux cercosporioses sont les plus prometteuses, car elles sont adaptables à toutes les conditions de production. S'ajoute à ces recherches la nécessité de disposer d'hybrides résistant aux nématodes, aux diverses formes de fusariose (maladie de Panama) et aux bactéries pathogènes apparues dans les années 1990.

L'hybridation pour lutter contre les parasites

Deux stratégies d'hybridation sont développées, l'une aboutissant à des hybrides tétraploïdes, l'autre à des hybrides triploïdes. La première consiste à améliorer une espèce intéressante, mais sensible aux parasites en la croisant avec une espèce résistante. On sélectionne, parmi les variétés existantes de l'espèce à protéger, une variété (triploïde) présentant une fertilité femelle, que l'on croise avec une variété diploïde résistante, telle l'espèce sauvage *Musa acuminata*. On obtient alors directement des hybrides tétraploïdes qui produisent de gros fruits (et d'autres variétés non viables présentant diverses ploidies). Cependant, très peu de ces hybrides présentent des fruits de qualité gustative équivalente à celle des variétés traditionnelles. De plus, ils se conservent mal après la récolte, ce qui restreint leur utilisation aux marchés locaux. Plusieurs de ces hybrides de plantains et bananes à cuire sont néanmoins cultivés.

Mise au point par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement),



4. PESTICIDES utilisés pour la culture bananière dans quelques pays (consommation estimée en 2006). Bien que réduite dans certains pays, comme le Bénin et les Antilles françaises, la consommation d'insecticides et de nématicides (en jaune) – les pesticides les plus dangereux – est loin d'être stoppée, notamment en Amérique centrale. Dans plusieurs pays, les fongicides de contact (en bleu) ont pris le relais des fongicides systémiques (agissant après absorption par le bananier, en vert), devenus indispensables dans la lutte contre les cercosporioses. Les herbicides tendent en revanche à disparaître partout (en violet).

la seconde méthode vise à créer de nouvelles variétés améliorées. Elle consiste à utiliser des variétés diploïdes sauvages ou améliorées et à les croiser pour créer des hybrides triploïdes. Traités à la colchicine, qui bloque la division cellulaire, ces hybrides deviendront des autotétraploïdes qui, croisés avec des diploïdes, donneront des triploïdes intra- ou interspécifiques stériles et parthénocarpiques. En 2003, deux hybrides ont passé le cap de la phase d'évaluation, mais une seule variété a été retenue. Cette dernière se caractérise par des fruits courts et nombreux au goût très différent de celui des Cavendish et par un retour de cycle très rapide, de l'ordre de quatre à cinq mois. Cependant, sa grande taille et son faux-tronc grêle sont peu compatibles avec une production intensive. En 20 ans, la création variétale a largement progressé et des hybrides ayant passé le stade de sélection de la résistance aux parasites (particulièrement des cercosporioses) sont en cours d'évaluation en milieu naturel.

Enfin, depuis quelques années, afin de mieux maîtriser les infections virales (et celles du charançon), on utilise des techniques d'amélioration différentes de l'hybridation classique, les gènes de résistance à ces parasites n'étant pas connus dans le genre *Musa*. En multipliant *in vitro* des bourgeons de la souche, les chercheurs obtiennent des suspensions de cellules, à partir desquelles ils sélectionnent des clones, parfois après avoir provoqué des mutations au hasard ou transféré des gènes conférant une résistance à une maladie. En Ouganda, à Cuba, en Colombie et dans quelques autres pays, des plants résistants à la cercosporiose noire et des variétés transgéniques résistant à la maladie de Panama, aux charançons et aux nématodes seraient en cours d'évaluation en plein champ. Comme toute recherche sur les OGM, ces travaux soulèvent de nombreuses questions écologiques ; souhaitons que l'évaluation de la biosécurité soit réalisée avec rigueur et indépendance.

En Guadeloupe et en Martinique, les agriculteurs, en étroite collaboration avec les chercheurs du CIRAD, de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), de l'IRD (Institut de recherche pour le développement), du CEMACREE (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) et de diverses équipes universitaires, dévelop-

La banane, rites et symboles		
Depuis longtemps « au service des humains », le bananier est intégré à la culture et aux croyances de nombreuses sociétés. En Inde, il est mentionné dans divers textes sacrés dès le VI^e siècle avant notre ère. Selon les croyances chrétiennes de l'Inde et du Sri Lanka, la banane était le fruit défendu offert par Ève à Adam, et la grappe de raisin de l'histoire des Hébreux devenait un régime de bananes. Le touffu de bananiers, avec son pied-mère, ses rejets fils et petits fils, est souvent rapproché de la famille humaine. Le juriste musulman Abu Hanifa (VIII^e siècle) fait ainsi dire à son disciple : « Pour quoi donc, mon fils, le mûre ressemble-tu point ? » Son raisonnement est le suivant : « Le mûre est comme le bananier, qui n'est bon à quelque chose qu'après la mort de son père ».	Nom de nombreuses ethnies associant le bananier à la féminité. Chez les Mélanésien, il symbolise la femme (produisant des fruits comme la femme donne naissance). Chez les Yanomama (Amazonie), la femme et l'homme occupent deux positions extrêmes, à l'image du bananier et du palmier dans le cycle agricole : le bananier est la première plante à fructifier et disparaître, alors que le palmier, le dernier à fructifier, subsiste même lorsque le jardin est devenu improductif. Les Bamoun (Cameroun), quant à eux, en font une fille, le nouveau-né au pied d'un bananier est une fille, d'un palmier un garçon. En Afrique, le bananier est au cœur des traditions des peuples du Sud (Ouganda, Rwanda, Burundi), le bananier est au cœur des traditions des peuples du Sud.	du Buhaya et du Busoga. Le garçon adulte offre comme dot des bananiers de la variété « Mpolongoma » (bon). Et s'il délaisse sa femme, celle-ci recourt au cultivar Ezioga, dont les bananes disposées en spirale sont censées empêcher les maris de batifoler. Le bananier est aussi le pilier de l'économie familiale. La présence de bananiers porteurs de régimes permet d'obtenir un prêt. La bière de banane se partage dans les réunions familiales et publiques, ainsi que lors de diverses cérémonies. Dans certaines cultures, enfin, le bananier est associé à la médecine : parce qu'il disparaît, le bananier est associé à la fragilité et de l'instabilité des choses du monde.

pent une démarche associant stratégie culturale, génétique biologique et utilisation de variétés résistantes : interruption des cycles de développement des pathogènes pour réduire leur dispersion (combinaisons de jachères et de rotations des cultures), création et développement de variétés résistantes compatibles avec les conditions d'exportation, développement des plantes qui assurent le couvert végétal entre deux périodes de culture bananière, amélioration des techniques de lutte contre le charançon et les maladies postrecoltes.

Vers une production durable

La recherche prospective s'intéresse aussi à trois aspects très différents. D'abord, elle prend en compte les perspectives du marché. Des niches particulières de marché se développent : banane biologique, banane équitable..., mais aussi une diversification des goûts, qui appelle à développer de nouvelles variétés. Ensuite, elle étudie les risques d'évolution du parasitisme : depuis moins de dix ans, on a vu une extension inquiétante de maladies et parasites émergents, tels le flétrissement bactérien en Afrique ou la maladie

des raves noires en Martinique. Il s'agit donc de veiller à la durabilité des résistances parmi les variétés sélectionnées et d'évaluer les contournements de ces résistances par les agents pathogènes.

La mise en place d'une production et d'une protection intégrées, enfin, impose l'étude des relations entre la durabilité du système de culture (notamment des résistances aux attaques de pathogènes) et l'agroécologie qui y règne, fruit de la réintroduction d'une diversité organisée (rotation, variétés, etc.) et de la promotion d'une diversité naturelle au niveau des sols.

Avec ces nouvelles conceptions et pratiques, on peut être optimiste quant à l'avenir de la culture de la banane pour l'exportation. En revanche, les productions de bananes légume – base de la sécurité et de l'indépendance alimentaire des pays pauvres – n'ont pas bénéficié de recherches soutenues avant les années 1970. Depuis, l'impact de la cercosporiose noire sur beaucoup de ces cultures a fait émerger, au plan international, la nécessité d'une recherche spécifique, axée sur la mise au point de variétés résistantes au parasitisme, l'utilisation de pesticides – trop onéreuse – et la lutte dans les pays concernés.

Improbables

L'ESSENTIEL

✓ Les astronomes ont, de façon inattendue, découvert des planètes autour d'étoiles à neutrons (résidus d'explosions en supernova), de naines blanches (cadavres d'étoiles de type solaire) ou de naines brunes (étoiles avortées).

✓ Ces planètes situées dans des systèmes extrêmes témoignent de l'universalité et de la robustesse du processus de formation planétaire.

L'un des spectacles les plus poignants des cieux est celui d'une naine blanche. Un tel astre a une masse comparable à celle de notre Soleil, mais il figure parmi les moins brillants, et son éclat ne cesse de faiblir.

Il ne s'agit pas tant d'une étoile que du cadavre d'une étoile. Pendant une durée pouvant atteindre dix milliards d'années, cet astre a été très semblable au Soleil et a brillé avec le même éclat. Mais lorsqu'il a commencé à être à court de combustible, il a connu une violente agonie. Il s'est dilaté jusqu'à 100 fois sa taille actuelle et est devenu 10 000 fois plus brillant (phase dite de « géante rouge »), avant d'éjecter par bouffées ses couches externes et de se recroqueviller en une braise rougeoyante de la taille de la Terre. Pour le reste de l'éternité, la naine blanche

continuera de vivre, en rayonnant de moins en moins d'énergie, s'éteignant peu à peu.

Et c'est la plus triste encore. Avec nos collègues nous avons trouvé dans notre Galaxie plus d'une douzaine de naines blanches. Autour desquelles tournent des astéroïdes, des comètes et peut-être même des planètes ; en d'autres termes, des cimetières de systèmes stellaires entiers.

Tant que les étoiles étaient en vie, elles se levaient chaque jour sur l'horizon de ces corps célestes. Elles en réchauffaient doucement le sol et faisaient s'agiter le vent. Des organismes vivants en ont peut-être même profité. Mais quand ces étoiles sont mortes, elles ont vaporisé ou englouti leurs planètes proches (ou internes), n'épargnant que celles occupant les marges lointaines et glacées.

Au fil du temps, les naines blanches ont détruit à leur tour la plupart de ces



Il existe des planètes autour d'étoiles atypiques.

où il ne devrait pas y en avoir. Le processus de formation planétaire serait-il plus universel qu'on ne le pensait ?

planètes

Michael Werner
et Michael Jura

survivants par effets de marée. Ces systèmes préfigurent le sort de notre propre système quand le Soleil mourra.

Les astronomes ont toujours envisagé l'existence de planètes en orbite autour d'autres étoiles. Mais ils imaginaient découvrir des systèmes ressemblant au Système solaire, centrés sur une étoile semblable au Soleil. Or quand les découvertes ont commencé à déferler, il y a une quinzaine d'années, il est vite apparu que les systèmes planétaires peuvent être très différents du nôtre. Le premier exemple a été 51 Pegasi, une étoile de type solaire dotée d'une planète plus massive que Jupiter et dont l'orbite est plus petite que celle de Mercure.

À mesure que les instruments gagnaient en sensibilité, des cas encore plus étranges se sont révélés. L'étoile de type solaire HD 40307 a été trouvée avec trois planètes de masses

comprises entre quatre et dix masses terrestres, dont les orbites sont au moins deux fois plus petites que celle de Mercure. L'étoile de type solaire 55 Cancri A possède pas moins de cinq planètes (de masses allant de 10 à 100 masses terrestres et des rayons orbitaux allant de un dixième de celui de Mercure à environ celui de Jupiter) et une voire deux étoiles compagnons ! Les systèmes planétaires imaginés par la science-fiction ont rapidement pris corps à côté des vrais...

Les systèmes associés à des naines blanches montrent qu'il n'est même pas nécessaire que les étoiles soient de type solaire. En effet, un véritable bestiaire de planètes sont en orbite autour de corps qui ne sont eux-mêmes pas plus gros que des planètes. La diversité de ces systèmes est aussi grande que celle des systèmes associés à des étoiles ordinaires.

Les astronomes ne s'attendaient pas à une telle omniprésence des systèmes planétaires, ni à leur robustesse ou à l'universalité des processus qui président à leur formation. Les systèmes planétaires semblables au nôtre pourraient ne pas être les plus répandus.

Bien qu'on l'ait un peu oublié aujourd'hui, la première planète extrasolaire découverte et confirmée était en orbite autour d'une étoile très différente du Soleil : il s'agissait du pulsar PSR 1257+12,

1. UNE NAÏF BRUNE est une étoile trop petite – parfois à peine plus massive que Jupiter – pour que les réactions de fusion s'allument en son cœur. Les astronomes ne pensaient pas trouver des planètes autour de ces étoiles avortées. Pourtant, il existe maintenant des indices de minisystèmes stellaires autour des naines brunes et d'autres objets improbables.

un cadavre stellaire ultradense, qui concentre une masse supérieure à celle du Soleil dans un diamètre d'une vingtaine de kilomètres seulement (on parle d'étoile à neutrons) et qui émet en outre un signal radio périodique. L'événement qui a engendré ce monstre, l'explosion en supernova d'une étoile de 20 masses solaires, a été bien plus violent que la fin d'une étoile de type solaire, et il est impensable que des planètes y aient survécu. Cette première planète extrasolaire a donc dû naître des cendres de l'explosion.

Un système qui renaît de ses cendres

Bien que les supernovae éjectent l'essentiel de leurs débris dans l'espace, une petite partie reste liée par la gravitation et retombe en formant un disque en orbite autour du résidu stellaire. Les disques sont les berceaux des planètes. On pense que les systèmes stellaires, dont le nôtre, naissent d'un nuage interstellaire amorphe de poussière et de gaz qui s'effondre sous sa propre gravité. La loi de conservation du moment cinétique empêche une partie du matériau de s'effondrer jusque sur l'étoile nouvellement née et le conduit à former un disque. Au sein de ce dernier, la poussière et le gaz s'accroissent pour former des planètes. Un processus comparable a pu se produire dans le disque résiduel de la supernova.

Les astronomes ont découvert la première planète, puis deux autres, autour du pulsar PSR 1257+12 en observant des écarts périodiques dans les impulsions radio qu'il émet. En effet, l'attraction gravitationnelle des planètes fait légèrement osciller l'étoile, et modifie ainsi la distance que doivent parcourir les impulsions. Malgré des recherches intensives, on ne connaît pas de système comparable autour d'un autre pulsar. Le pulsar PSR B1620-26 possède au moins une planète (détectée de la même façon). Mais elle est tellement loin de l'étoile qu'elle ne s'est sans doute pas formée à partir de débris : elle aurait été arrachée à une autre étoile.

En 2006 cependant, le télescope spatial *Spitzer* a découvert une émission infrarouge inattendue en provenance de l'étoile à neutron AU 0142+61. Elle pourrait provenir de la magnétosphère de l'étoile ou d'un disque en formation. Cette étoile à neutron s'est formée lors de l'explosion

Les astronomes détectent en général les planètes extrasolaires par leurs effets sur le spectre lumineux (méthode des vitesses radiales), la luminosité (méthode des transits) ou la position (astrométrie) de leur étoile hôte. Dans la plupart des cas évoqués dans cet article, les astronomes se focalisent sur un indice plus indirect : la présence d'un disque de poussière autour de l'étoile. Certaines étoiles nouvellement nées sont accompagnées d'un disque protoplanétaire, lieu supposé de formation des planètes. Les jeunes matures arborent parfois un disque de débris, résultant de la collision et de la poration de comètes et d'astéroïdes. Il signale la présence de planètes actuelles ou passées.

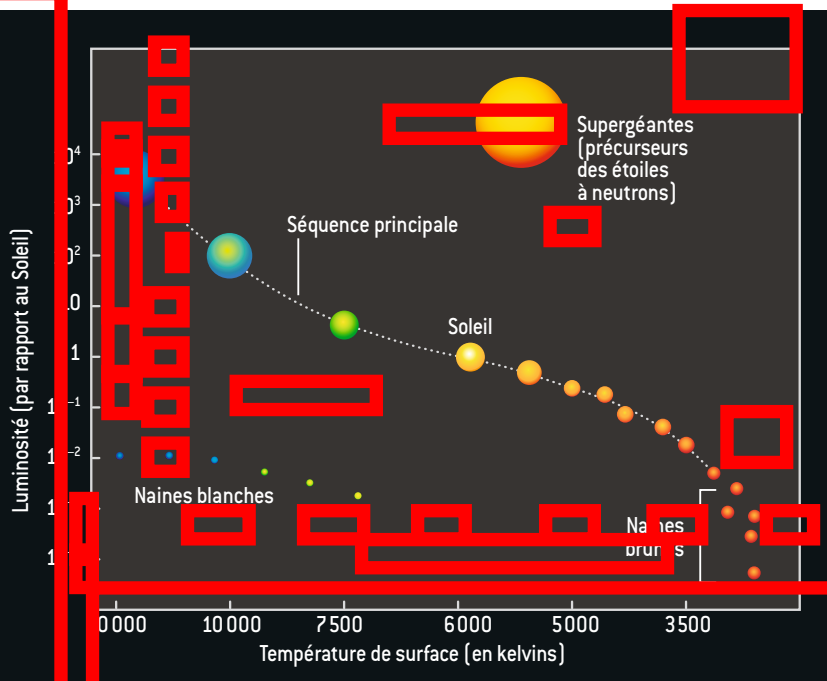
On distingue ces deux types de disques par la façon dont ils rayonnent dans l'infrarouge l'énergie de la lumière stellaire reçue. Le télescope spatial *Spitzer*, lancé en 2003, s'est révélé être une machine à découvrir des disques. Ses caméras infrarouges à grand champ cap-

turent en effet la lumière des étoiles et repèrent celles ayant peut-être un disque et méritant une étude plus approfondie.

Spitzer est inscrit dans le prolongement des télescopes spatiaux infrarouges tels que IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) dans les années 1980 et ISO (*Infrared Space Observatory*) dans les années 1990. *Spitzer* réalisait un relevé complet du ciel, *Spitzer* pointait des corps célestes particuliers pour les étudier avec précision.

Après plus de cinq ans d'observations, la réserve d'hélium liquide de *Spitzer* pour maintenir la température du télescope proche du zéro absolu est épuisée. *Spitzer* s'est réchauffé à une trentaine de kelvins, ce qui réduit considérablement son acuité infrarouge. Il pourra cependant continuer à scruter le ciel dans l'infrarouge proche jusqu'à mi-2011. Le télescope spatial *James Webb*, dont le lancement est prévu en 2014, prendront le relais.

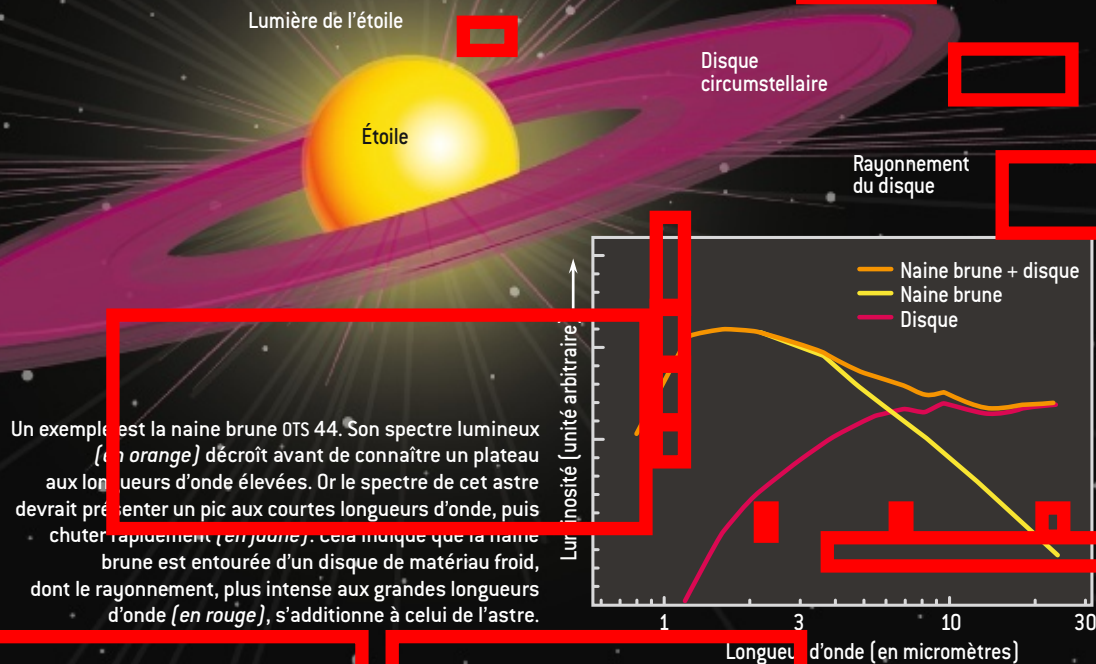
Même lorsque le système stellaire observé est trop lointain pour être spatialement résolu, le spectre lumineux révèle sa composition.



ET C'EST AUTOUR DES ÉTOILES ORDINAIRES, appartenant à la « séquence principale » (bande bien définie dans le diagramme liant la luminosité à la température de surface), que les astronomes ont d'abord recherché des systèmes planétaires semblables au nôtre. Mais il existe des systèmes autour d'objets hors de la séquence principale, telles les naines blanches et les naines brunes.

L'INFRAROUGE RÉVÈLE LES DISQUES ABRITANT LES PLANÈTES

Un disque circumstellaire de poussière et de gaz, comme celui qui a donné naissance aux planètes du Système solaire, absorbe la lumière de l'étoile et réémet une partie de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. La lumière que nous observons est la somme de ces deux composantes.



Melissa Thomas

d'une supernova il y a quelque 100 000 ans, et il faut de l'ordre d'un million d'années pour que les planètes s'agglomèrent. Si ce rayonnement infrarouge signale la présence d'un disque, le futur système pourrait un jour ressembler à celui du pulsar PSR 1257+12.

Des astéroïdes au menu

De nombreuses naines blanches ont aussi des disques, mais d'un type un peu différent : ils trahissent la présence effective de corps en orbite et pas seulement la possibilité d'en former. Comme avec l'étoile 4U 0142+61, l'indice est un excès d'émission infrarouge. En 1987, l'IRTF (*Infrared Telescope Facility*), au sommet du Mauna Kea, à Hawaï, a détecté un excès de lumière infrarouge provenant de la naine blanche G 29-38. Le spectre de ce surplus de rayonnement était celui d'un corps ayant une température de 1 200 kelvins, beaucoup plus froid que la surface de l'étoile, à 20 000 kelvins. Les astronomes

ont d'abord pensé qu'une autre étoile plus froide était en orbite autour de la naine blanche. Mais en 1990, ils ont montré que l'émission infrarouge variait à l'unisson avec la luminosité de l'étoile, indiquant un rayonnement réfléchi ou réémis. L'explication la plus vraisemblable est la présence d'un disque circumstellaire chauffé par la naine blanche.

L'étoile G 29-38 présente une autre propriété étrange : d'après son spectre lumineux, les couches externes contiennent des éléments lourds tels que du calcium et du fer. C'est surprenant, car le champ gravitationnel à la surface d'une naine blanche est si intense que ces éléments devraient sombrer dans les profondeurs. En 2001, l'un d'entre nous (M. Jura) a proposé une explication simple à la fois pour l'excès d'infrarouge et pour les éléments lourds : la naine blanche a récemment déchié un astéroïde qui s'était aventuré dans son intense champ gravitationnel. Une cascade de collisions a réduit les débris en un disque de poussière, qui est en partie tombé à la surface de l'étoile.



Russ Linderoth - Lockheed Martin Space Systems

LE TÉLÉSCOPE SPATIAL Spitzer, ici en construction, est le pendant pour l'infrarouge du télescope spatial Hubble.

Des observations ont depuis confirmé ce scénario. Des télescopes au sol et le télescope spatial *Spitzer* ont permis d'identifier une cinquantaine de naines blanches présentant des excès d'infrarouge et des

tils tels que le carbone et le sodium, par rapport aux éléments plus stables sous forme solide, tels le silicium, le fer et le magnésium. Cette répartition correspond à celle des astéroïdes et des planètes

notée U A) et ne sont pas plus massifs qu'un astéroïde de 30 kilomètres de diamètre, ce qui est en accord avec l'hypothèse qu'ils proviennent de la désintégration d'un tel objet. Ce ne sont pas des lieux de formation de planètes, mais plutôt des indicateurs que du matériau planétaire a survécu au mort de l'étoile. Des calculs théoriques suggèrent que des astéroïdes et des planètes de type terrestre peuvent survivre à la transformation de leur étoile en géante rouge s'ils gravitent à plus d'une unité astronomique. Quand notre Soleil mourra, par exemple, Mars devrait s'en sortir, alors que le destin de la Terre est incertain.

La naine blanche WD 2226-210 nous donne une idée des régions d'un système planétaire qui pourraient survivre à la fin de l'étoile. Cette naine blanche est toute récente, si bien que les couches externes éjectées par l'étoile de type solaire initiale sont encore visibles sous la forme d'une des nébuleuses planétaires les plus

LES DISQUES OBSERVÉS AUTOUR DES NAINES BLANCHES

sont sans doute des astéroïdes réduits en poussière à la suite d'un passage trop près de l'étoile.

anomalies en éléments lourds comparables. Pour G29-38 et sept autres étoiles, *Spitzer* a même identifié l'émission infrarouge de silicates présents dans les disques. Ces silicates ressemblent à la poussière dans le Système solaire et sont très différents de la poussière de l'espace interstellaire. Le plus, les éléments lourds ne se trouvent pas en quantités égales dans les couches externes de ces naines blanches. Elles sont déficientes en éléments vola-

tils du Système solaire. Tous ces indices étayent l'hypothèse selon laquelle les disques observés sont des astéroïdes réduits en poussière.

Les disques des naines blanches sont beaucoup plus petits que ceux qui donnent naissance aux planètes autour des jeunes étoiles de type solaire. À en juger par l'émission infrarouge, ils ne s'étendent que sur 0,01 unité astronomique (la distance moyenne du Soleil à la Terre.

LES SYSTÈMES AUTOUR D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons, vestiges d'étoiles massives ayant explosé en supernova, sont sans doute les hôtes les plus inattendus pour des systèmes planétaires. L'étoile à neutrons 4U 0142+61, âgée de 100 000 ans, est ceinturée d'un disque de débris stellaires. Ces débris pourraient être en train de s'agréger en briques planétaires (vue d'artiste à droite). La présence de planètes a été confirmée autour d'une autre étoile à neutrons, PSR 1257+2. Ses impulsions radio, normalement périodiques, sont légèrement décalées dans le temps (ci-dessous à droite), indiquant que l'étoile est perturbée par trois corps en orbite (à gauche).

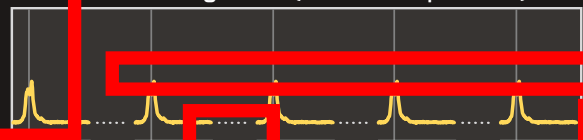
ÉTOILE À NEUTRONS ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

Nom : 4U 0142+61
Âge : 100 000 ans
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon du disque : 1 unité astronomique

PULSAR ET PLANÈTES

Nom : PSR 1257+2
Âge : 800 millions d'années
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon des orbites planétaires : 0,19, 0,366 et 0,46 unités astronomiques
Masses des planètes : 0,02, 4,3 et 3,9 masses terrestres

Émissions radio régulières (absence de planètes)



Émissions radio irrégulières (présence de planètes)



NASA / TECH. NURT Spitzer Science Center

NASA Thomas

célèbres, la *Pelux Nebula*. WD 2226-210 est le chaînon manquant entre les étoiles de type solaire et les naines blanches plus âgées comme G 9-38. Elle est accompagnée d'un disque poussiéreux qui s'étend jusqu'à 100 UA, une échelle comparable à celle du Système solaire. Ce disque est beaucoup plus étendu que ceux d'autres naines blanches, trop pour qu'il soit constitué d'astéroïdes débris éjectés par la gravité de l'étoile. Il doit plutôt être formé de débris créés par des collisions mutuelles d'astéroïdes ou de comètes.

Par conséquent, quand l'étoile qui a donné naissance à la naine blanche WD 2226-210 est morte, au moins une partie des astéroïdes et comètes devaient se trouver suffisamment loin pour survivre. Et d'éventuelles planètes distantes, *a priori* plus résistantes, devaient avoir également survécu. En se refroidissant, la naine blanche éclairera plus faiblement le disque, dont les régions externes finiront par deve-

nir invisibles. Mais le disque continuera à être la source d'astéroïdes qui s'approcheront assez près de la naine blanche pour être réduits en poussière.

Naines étoiles, vrais disques

Les naines brunes sont le troisième exemple d'étoiles de type non solaire susceptibles d'héberger des planètes. Elles sont très différentes des naines blanches, malgré leur nom. Elles ne résultent pas de la mort d'une étoile de type solaire : ce sont des objets substellaires. Elles commencent à se former de la même façon que les étoiles mais, pesant moins de huit pour cent du Soleil, elles ne sont jamais devenues assez chaudes et denses pour que la fusion nucléaire se maintienne dans leur cœur. Tout au plus rayonnent-elles en infrarouge la chaleur qu'elles ont accumulée lors de leur formation. Ces

LES AUTEURS



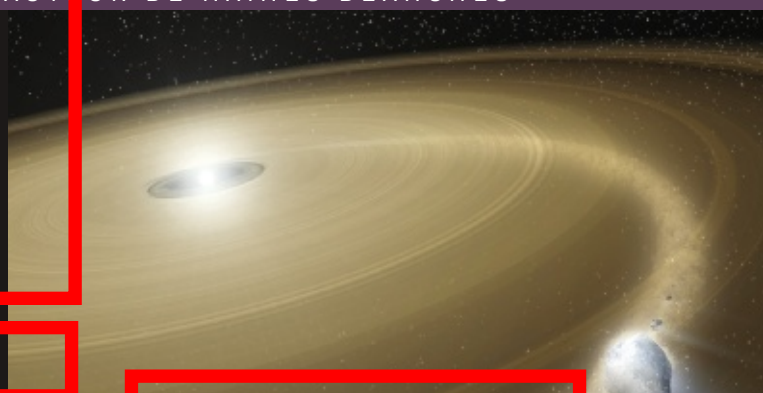
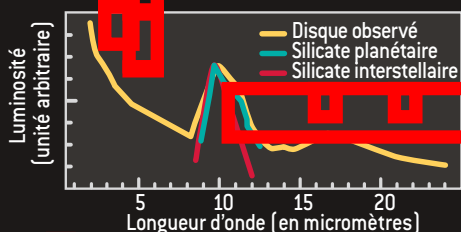
Michael WERNER est responsable scientifique du télescope spatial *Spitzer* de la NASA



Michael JURA est professeur d'astronomie à l'Université de Californie à Los Angeles.

LES SYSTÈMES AUTOUR DE NAINES BLANCHES

De nombreuses naines blanches s'accompagnent d'un minuscule disque de matériau, sans doute les restes d'un astéroïde pulvérisé par un passage près de l'étoile. Certains disques ont révélé dans leur spectre la signature de silicates (*courbe jaune ci-dessous*). Ce spectre correspond à celui des silicates des corps rocheux du Système solaire (*courbe verte*), plutôt qu'aux silicates interstellaires (*courbe rouge*). Cela suggère que des planètes ont un jour résidé autour de la naine blanche, voire se trouvaient toujours, invisibles, en périphérie du système.



NAIN BLANCHE ET DISQUE D'ACCRÉTION

Nom : G 29-38
Âge : 600 millions d'années
Rayon de l'étoile : 10 000 kilomètres
Étendue du disque : 0,001 à 0,01 unité astronomique

Un second type de disque de débris autour d'une naine blanche est visible (*en rouge*) au centre de cette image infrarouge de la nébuleuse de l'Hélice. Il constitue probablement l'équivalent de la ceinture de Kuiper, une population de petits corps glacés du Système solaire. De tels disques pourraient exister autour d'autres naines blanches, mais ils sont indétectables, car ils ne sont pas assez éclairés par leur étoile.

NAIN BLANCHE ET DISQUE DE DÉBRIS

Nom : WD 2226-210 (nébuleuse de l'Hélice)
Âge : 10 000 ans
Rayon de l'étoile : 10 000 kilomètres
Rayon du disque : 100 unités astronomiques

15 dernières années, les relevés astronomiques ont découvert des centaines de naines brunes, parfois à peine plus massives que Jupiter.

Ces astres, même les plus petits d'entre eux, peuvent posséder des disques et donc peut-être des planètes. Cette possibilité est étayée par des observations montrant que les disques des naines brunes subissent une série de modifications systématiques (dont une baisse de l'émission infrarouge des silicates) attribuables à la

présence de disques d'étoiles plus grosses et signent la croissance des planétésimaux (les « blocs » planétaires). Les disques des naines brunes sont trop peu fournis pour que des planètes aussi massives que Jupiter se forment, mais ils sont largement suffisants pour des planètes comme Uranus ou Neptune. Certaines équipes ont annoncé la découverte de planètes autour de naines brunes, mais aucune de ces affirmations n'est démontrée de façon certaine.

En résumé, les astronomes ont découvert des planètes autour d'au moins une

centaine de naines brunes.

La course aux nouvelles Terres

En mars 2009, le télescope spatial *Kepler* de la NASA a entamé sa mission de quatre ans ayant pour objectif de découvrir des planètes de type terrestre, ou telluriques. Comme son prédécesseur, le satellite *CoRoT* du Centre national d'études spatiales français (CNES), lancé en 2006, *Kepler* guette la baisse de luminosité éventuelle chez une des quelque 150 000 étoiles surveillées. Une diminution de l'éclat d'une étoile peut avoir toutes sortes d'explications, mais si elle se produit périodiquement, cela n'est plus du hasard : une planète se trouve certainement sur une orbite qui l'amène à couper la ligne de visée entre le télescope et l'étoile. À chaque passage (ou transit) devant son étoile, la planète bloque une partie de la lumière stellaire. Une planète de la taille de la Terre ferait décroître la luminosité de son étoile de l'ordre de 1 pour 10 000 environ.

En 2007, *CoRoT* a détecté une planète ayant un diamètre près de deux fois plus grand que celui de la Terre. *CoRoT* 7b – c'est son nom – est en orbite tellement serrée autour de son étoile que l'année n'y dure que 20 heures terrestres ! *Kepler*, avec un miroir trois fois et demie plus grand que celui de *CoRoT*, devrait trouver des dizaines ou des centaines de simili-Terres en orbite à des distances plus confortables de leur étoile (la méthode de détection la plus fréquente est la mesure des variations de luminosité, fondée sur la petite attraction exercée par la planète sur son étoile, ce n'est pas possible à des

planètes aussi petites). Mais pour observer ces transits, les orbites des planètes doivent couper notre ligne de visée, ce qui, statistiquement, se produit une fois sur 100 seulement. *Kepler* devrait néanmoins pouvoir recenser un échantillon statistiquement significatif des planètes jumelles de la Terre. Selon les estimations, il a son actif 700 candidats planétaires. Certains de ces candidats sont confirmés.

Mais si les astronomes atteignent cet objectif, il restera encore

ils ne pourront discerner aucun des indices de la vie. Même la mission *SIM* (*Space Interferometry Mission*), dont le lancement est prévu vers 2015, ne nous apprendra pas grand-chose sur les planètes telluriques qu'elle découvrira.

Les instruments capables d'évaluer la présence de la vie sur une planète seront disponibles plus tard, mais leur coût est prohibitif. Les projets *TPF* (*Terrestrial Planet Finder*) de la NASA et la mission *Darwin* de l'Agence spatiale eu-

Large Telescope européen. Bien qu'ils ne soient pas conçus spécifiquement pour étudier les planètes, ces télescopes seront équipés de coronographes, qui permettent de bloquer la lumière d'une étoile pour observer d'éventuels corps peu lumineux se cachant derrière elle. Ces instruments pourraient produire des images de planètes géantes gazeuses autour de naines brunes (s'il y en a). Ils pourraient aussi recueillir le spectre des objets en orbite serrée.

Ainsi, durant les quelques années à venir, les missions *CoRoT* et *Kepler* livreront des résultats passionnants, mais ensuite arrivera sans doute une période de frustration où l'on devra se contenter de rêver à ce qui pourrait encore être découvert. Une telle progression par à-coups n'est pas rare en science. Des résultats positifs appuieront certainement le financement de nouveaux observatoires spatiaux. La recherche de planètes dans des environnements extrêmes, tels que le voisinage d'étoiles à neutrons, de naines blanches et de naines brunes, nous montrera dans quelle mesure la formation planétaire est robuste. Mais il faut aussi se préparer à la possibilité que la Terre n'occupe pas une place particulière dans toute la gamme des planètes.



une question cruciale : quelles sont les conditions sur ces planètes ? Sont-elles favorables à la vie ? Lorsqu'une planète géante gazeuse transite devant son étoile, les astronomes peuvent analyser la composition de son atmosphère en mesurant l'absorption de la lumière stellaire à différentes longueurs d'onde. Mais

européenne (ESA) pourraient réaliser des mesures spectroscopiques de la surface et de l'atmosphère des planètes telluriques, mais aucun n'a encore dépassé le stade de l'étude. Un projet commun coûterait près de deux milliards d'euros et prendrait une décennie. Pour l'instant, nos meilleurs espoirs sont le télescope

Les petites planètes sont détectables lorsqu'elles passent devant leur étoile.

Donald Goldsmith,

ancien éditeur scientifique et auteur de l'ouvrage *400 Years of the Telescope*

LES SYSTÈMES AUTOUR DE NAINES BRUNES

De nombreuses naines brunes possèdent un disque au sein duquel des planètes pourraient se former. C'est le cas de la naine brune OTS 44, âgée d'environ deux millions d'années – l'âge auquel on pense que les planètes du Système solaire ont commencé à se former. Son disque contient assez de matériau pour former l'équivalent d'Ura-

nus ou de Neptune. Le fait que des planètes puissent se former dans un environnement aussi peu propice que les abords d'une naine brune, d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons indique que la formation planétaire est un processus beaucoup plus robuste que ne le pensaient les astronomes.

NAINES BRUNES ET DISQUE

Nom : OTS 44

Âge : 2 millions d'années

Rayon de l'étoile : 100 000 kilomètres

Étendue du disque : 0.01 à 0.1 unité astronomique

NASA/JPL-Caltech/T. Pyle/Spitzer Science Center

étoile à neutrons, des astéroïdes et des comètes autour de plus d'une douzaine de naines blanches, et des indices des premières étapes de formation planétaire autour de naines brunes.

À terme, l'étude de ces systèmes extrasolaires a deux objectifs. Tout d'abord, en apprenant davantage sur notre Système solaire, en particulier sur son évolution et sa structure à grande échelle, des caractéristiques difficiles à étudier étant données les limites de notre perspective temporelle et spatiale. On espère aussi replacer le Système solaire dans son contexte. Est-il représentatif ou fait-il figure d'exception ? La diversité des systèmes planétaires cache-t-elle des processus de formation communs ? La similarité entre la composition des astéroïdes du Système solaire et celle du matériau qui tombe sur les naines blanches suggère que oui.

Le second objectif est de déterminer dans quelle mesure la vie pourrait être répandue dans l'Univers. Dans notre voisinage galactique, les naines brunes sont

à peu près aussi nombreuses que les étoiles. « L'étoile » la plus proche du Soleil est-elle une naine brune qui reste à découvrir ? Les planètes extrasolaires les plus proches sont-elles en orbite autour d'une naine brune ? Le satellite WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*), lancé par la NASA en décembre 2009, découvrira sans doute dans les années à venir des naines brunes très proches. Les éventuelles planètes telluriques autour des naines brunes n'élargissent pas simplement la gamme des habitats possibles, elles laissent aussi imaginer une vie extraterrestre qui se développe à la faible lueur rougeoyante d'une naine brune.

De même, la présence d'astéroïdes et de comètes autour de naines blanches suggère que les planètes peuvent survivre à la mort d'une étoile de type solaire. Si la vie pouvait s'adapter à de tels changements de conditions, peut-être se maintiendrait-elle dans l'environnement de ces étoiles mortes. Le spectacle des naines blanches ne serait alors pas aussi désespérant. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

I. Cognard et G. Theureau, Les pulsars des étoiles à planètes, *Dossier Pour la Science* n° 64, juillet-septembre 2009, http://bit.ly/dossier64_pulsars

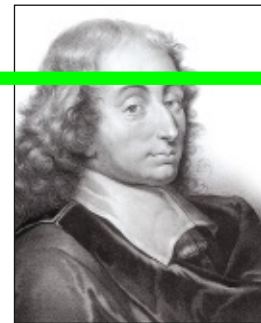
B. Zuckerman et al., The chemical composition of an extrasolar minor planet, *Astrophysical Journal*, vol. 671, n° 2, pp. 872-877, 10 décembre 2007. En ligne sur : <http://arxiv.org/abs/0708.0198>

M. Jura et al., Externally-polluted white dwarfs with dust disks, *Astrophysical Journal*, vol. 663, n° 2, pp. 1285-1290, 2007. En ligne sur : <http://arxiv.org/abs/0704.1170>

M. Werner, L'héritage de Spitzer, *Pour la Science* n° 388, février 2010, http://bit.ly/pls388_spitzer

D. Ardila, Les débris des systèmes planétaires, *Pour la Science* n° 399, mai 2004, http://bit.ly/pls399_ardila

HISTOIRE DES SCIENCES

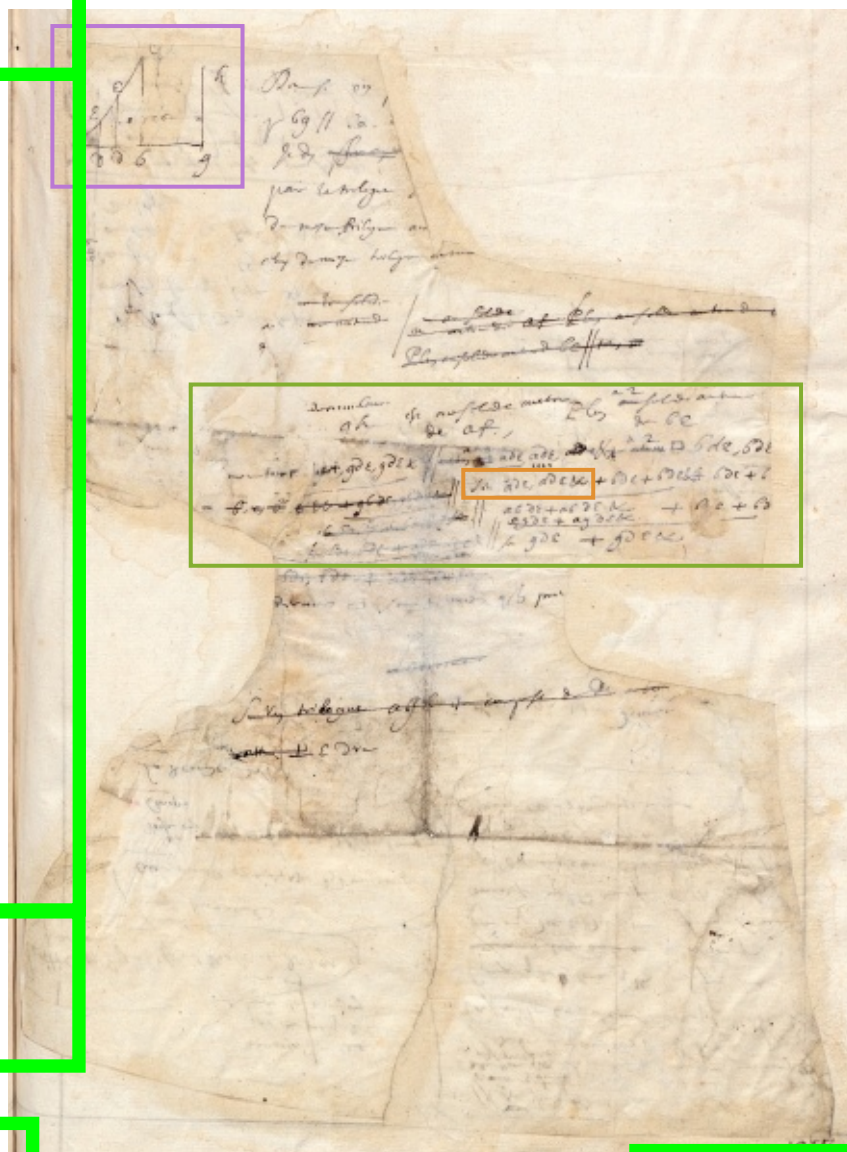
Un théorème géométrique
parmi les *Pensées* de Pascal

Des notes de géométrie de Pascal ont été retrouvées au verso d'un feuillet des *Pensées*, révélant les coulisses d'un de ses ouvrages mathématiques, les *Lettres de A. Dettonville*.

Dominique DESCOTES

L'œuvre mathématique de Blaise Pascal (1623-1662) ne nous est connue que de manière partielle. Rien ne subsiste des manuscrits originaux de son grand traité sur les coniques – intersections d'un plan et d'un cône – ni de sa correspondance avec Pierre Fermat sur la « géométrie du hasard », réflexions sur les jeux de hasard qui annoncent le calcul des probabilités. Surtout, les manuscrits de ses ouvrages imprimés au XVII^e siècle, le *Traité du triangle arithmétique* et les *Lettres de A. Dettonville*, ont été détruits. Dans le premier, Pascal étudie les propriétés du triangle arithmétique, organisation des nombres entiers en triangle rectangle qui facilite le calcul de sommes de suites d'entiers ; le second est en partie consacré à la cycloïde, une courbe décrite par un point fixé au bord d'une roue lorsque celle-ci roule sans glisser le long d'une droite (voir la figure 2). Comme la plupart des traités mathématiques de l'époque, ces deux ouvrages ne nous offrent qu'un produit pour ainsi dire achevé : ils sont entièrement rédigés sous forme rhétorique, voire littéraire. Jusqu'à présent, faute de tout manuscrit original autographe, nous ne disposons d'aucune trace de la manière dont Pascal préparait son texte, et on admettait couramment qu'il n'avait jamais employé d'écriture symbolique, de quelque type qu'elle soit.

Paradoxalement, c'est le *Recueil* des manuscrits originaux des *Pensées* de Pascal, déposé à la Bibliothèque nationale de France, et destiné à recueillir les grands textes religieux et moraux de Pas-



cal, qui a permis de lever un pan du voile qui couvre les méthodes de rédaction de notre géomètre. Le *Recueil des Pensées* se présente comme un gros volume relié, sur les feuillets duquel ont été collés les papiers autographes de Pascal, retrouvés après sa mort. Les travaux en cours depuis une dizaine d'années sur ce document en vue de la réalisation d'une édition électronique des *Pensées* m'ont amené à remarquer, parmi les 496 pages du gros volume, un autographe négligé, malgré son intérêt considérable pour l'histoire des sciences.

Le document ne doit d'avoir été préservé qu'à ce fait qu'il porte au recto, page 409, des notes elliptiques prises en vue de la rédaction des *Provinciales*. Publiées en 1656-1657, ces lettres écrites « à un provincial par un de ses amis » visaient à défendre le théologien augustinien Antoine Arnauld, qu'une machination conduite par les ennemis du monastère de Port-Royal (monas-

L'AUTEUR



Dominique ESCOTES, professeur à l'Université Blaise Pascal (Clermont II), est chercheur au Centre international Blaise Pascal (CERHAC-CIBP, UMR 5037, CNRS-Université Blaise Pascal).

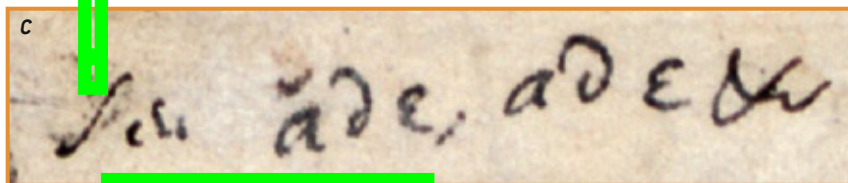
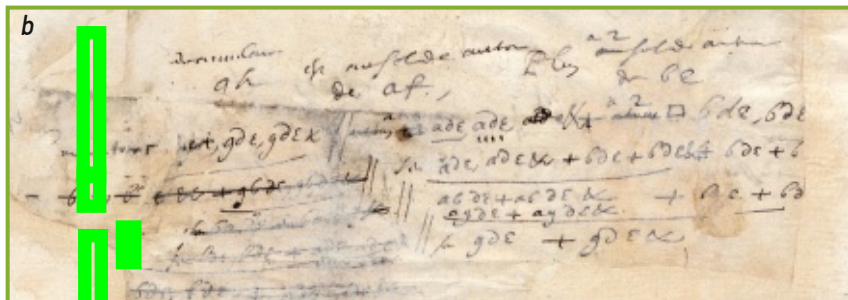
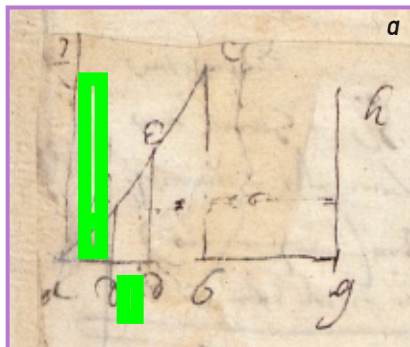
tère de la haute vallée de Chevreuse où se sont rassemblés les disciples de saint Augustin) avait privé de son titre de docteur de Sorbonne. Pascal avait griffonné les notes de la page 409 du *Recueil des Pensées* sur un papier de réutilisation, mais il n'avait pas eu l'occasion de les exploiter dans la composition de son ouvrage, et il avait par conséquent conservé le document. Or au verso, sur la page 410 du *Recueil*, apparaît, à travers une fenêtre découpée dans la feuille du cahier, un brouillon autographe d'une proposition de géométrie qui a jusqu'à présent complètement échappé aux éditeurs des *Pensées*, et n'a par conséquent fait l'objet d'aucune publication.

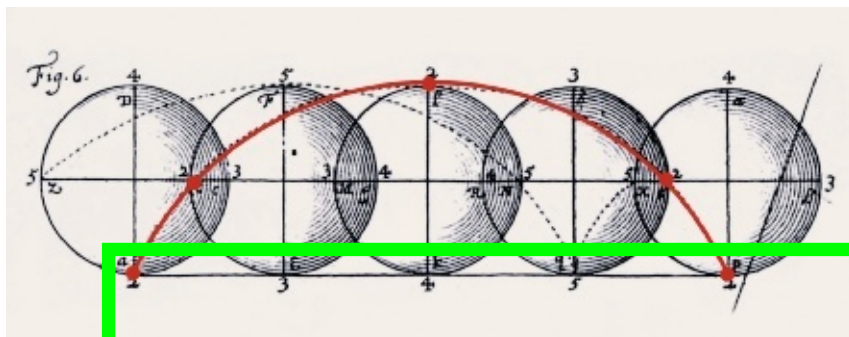
Au dos d'un brouillon des *Provinciales*

Le document a, en quelque sorte, été victime de la séparation des disciplines qui caractérise la recherche et l'enseignement en France préoccupés avant tout de déchiffrer les textes d'ordre apologétique et religieux, les éditeurs des *Pensées* n'ont pas jugé cette page digne d'être reproduite et, de leur côté, les historiens des sciences n'ont jamais eu l'idée d'aller chercher une proposition de géométrie dans les brouillons de l'*Apologie de la religion chrétienne*. Placé sous les yeux de toute la monde et jamais regardé, le théorème attendait vainement qu'on s'aperçoive de son existence depuis le XVIII^e siècle...

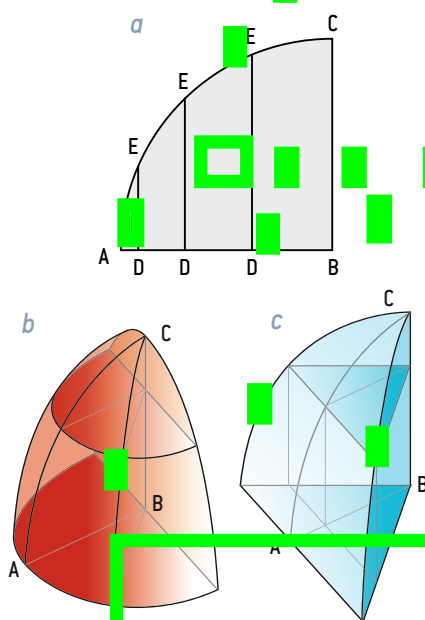
La page 409 permet de dater approximativement la partie mathématique qui figure au verso : la campagne des *Provinciales* a lieu de début 1656 à 1657. Or le brouillon du verso est antérieur (il est mutilé par un découpage de Pascal lui-même, alors que le texte au recto est épargné). Il doit donc remonter à 1655 ou 1656. À cette époque, Pascal a une activité intense de polémiste contre les jésuites qui attaquent les disciples de saint Augustin ; il commence aussi à élaborer son *Apologie de la religion chrétienne* dont nous connaissons les fragments sous le titre de *Pensées*. Il n'abandonne cependant pas les sciences pour autant : en 1654, il a fait imprimer son *Traité du triangle arithmétique*, et en juin 1658, il proposera

1. LE MANUSCRIT DE GÉOMÉTRIE découvert au dos d'un feuillet des *Pensées* de Pascal (page ci-contre). Le savant y étudie le volume engendré par la rotation d'un triligne abc autour d'un axe gh (a). Très brouillon et abîmé, le manuscrit énonce un théorème dans une notation symbolique (b). Les traits horizontaux, par exemple, séparent les étapes du raisonnement, et les doubles barres verticales représentent l'égalité entre des sommes. Pour indiquer la somme de tous les trilignes ade qui composent le triligne abc , notamment, Pascal utilise le symbole $S(c)$. Le calcul intégral n'est plus très loin...





2. LE DÉFI DE LA ROULETTE consistait à étudier les propriétés de la cycloïde (en rouge), courbe décrite par un point fixé à une roue, lorsque celle-ci roule le long d'une droite horizontale. Il s'agissait notamment de déterminer les caractéristiques du solide engendré par la rotation de la courbe autour de son axe de symétrie, notamment son volume, sa surface courbe et son centre de gravité. Pascal lança ce concours en 1658 par circularité, avec une récompense de 60 pistoles – l'équivalent du loyer annuel d'une maison à Paris. Publiées en 1659, les *Lettres de A. Dettonville* sont la solution que propose Pascal, sous un pseudonyme, à ce défi.



3. POUR CALCULER LE VOLUME du solide engendré par un triline ABC (a) tournant autour de son axe BC (b), Pascal construit un autre solide, l'« onglet », qui épouse lui aussi la forme du triline, mais dont la base est un triangle rectangle isocèle de bissectrice AB (c). En sommant les tranches d'onglet parallèles à cette base (des triangles rectangles isocèles elles aussi), Pascal détermine le volume de l'onglet. Connaissant par ailleurs le rapport des volumes des deux solides (c'est le rapport des surfaces de leurs bases), il en déduit le volume du premier solide. Le théorème du manuscrit généralise cette méthode à la détermination du volume engendré par diverses rotations d'un triline.

publiquement un concours à tous les mathématiciens d'Europe, les défiant de résoudre une liste de problèmes sur la roulette, c'est-à-dire sur la courbe qu'elle engendrait la cycloïde. En octobre, personne n'ayant complètement satisfait au défi, il publiera ses résultats sous le titre de *Lettres de A. Dettonville*.

Un théorème sur le calcul de volumes

Le bréviaire mathématique qui nous intéresse, page 410 du *Recueil des Pensées*, est lié à ces travaux. Placé tête-bêche, il n'est visible qu'une fois parce que les ouvriers qui, au XVIII^e siècle, ont confectionné le *Recueil des originaux*, ont percé dans le folio une fenêtre qui permet de voir le côté du papier collé sur le folio et support (voir la figure 1).

De quel est-il question dans ce document ? D'abord, on constate que, contrairement aux textes imprimés, il est écrit sous forme symbolique, et non rhétorique : c'est la preuve que Pascal possédait son propre symbolisme. Celui-ci n'a rien à voir avec le nôtre ni avec celui de l'algèbre cartésienne. Les larges coups de plume horizontaux qui séparent les différentes expressions du raisonnement, par exemple (voir la figure 1b), ne sont pas des barres de rapports : elles séparent les temps successifs du raisonnement, et les transformations des expressions symboliques. Les doubles barres obliques symbolisent l'éga-

lité entre des sommes de corps géométriques. Ensuite, Pascal y traite, dans un langage qui est celui de la *méthode des indivisibles*, ancêtre de ce qui deviendra le calcul différentiel et intégral, de corps géométriques qu'il étudiera dans les *Lettres de A. Dettonville*. Si elles ont été rédigées pour apporter une solution au « défi de la roulette », ces lettres ont en effet une portée bien plus vaste : Pascal y propose des méthodes générales de calcul de la dimension et des centres de gravité des solides et des surfaces planes et courbes.

La figure tracée sur le document (voir la figure 1a) représente ce qu'il appelle un *triline* : la surface limitée par deux droites perpendiculaires et une ligne courbe monotone. Un des problèmes du défi de la roulette est la détermination du volume sous la cycloïde, lorsque celle-ci tourne autour de son axe de symétrie. Dans les *Lettres de A. Dettonville*, pour résoudre ce problème, Pascal prend le cas général d'un triline ABC quelconque (voir la figure 3). Tourné autour de son axe BC, celui-ci engendre un demi-solide de rotation, dont il cherche le volume, la surface courbe et le centre de gravité. Il le compare pour cela à un autre solide, l'« onglet », construit sur le même triline, mais d'un volume plus simple à calculer.

L'originalité du théorème dont Pascal donne la démonstration, c'est qu'il concerne des solides un peu différents, tel celui construit par rotation du triline ABC autour de la parallèle à BC passant par A (voir la figure 1a). Le théorème de Pascal, démontré sous sa forme rhétorique dans les *Lettres de A. Dettonville*, donne le volume de ce solide en le comparant à celui engendré par la rotation du triline ABC autour de l'axe AH, parallèle à l'axe BC et perpendiculaire à la base AB du triline.

Une notation autre que celle de Descartes

Mais le plus nouveau est le système symbolique utilisé. Pour désigner une somme indéfinie de lignes ou de surfaces (l'ancêtre de ce que nous appelons une intégrale), par exemple pour désigner la « somme » de « tous les trilignes ADE », Pascal emploie le symbole S suivi de « des », et des lettres qui désignent les éléments symboliques (voir la figure 1c).

Ainsi, « S des ade, ade &c » signifie : la « somme indéfinie des trilogues ADE ». Les lecteurs de Leibniz (1646-1716) ne man-

queront pas d'être frappés par la ressemblance de ce S avec le symbole $\int$ rendu célèbre par l'inventeur du calcul intégral. L'intérêt de cette symbolique est qu'elle n'est pas de même nature que l'écriture algébrique de la Géométrie cartésienne. Il s'agit de la symbolique d'un géomètre écrivain. Elle schématise bien la progression du raisonnement et permet de suivre les opérations successives qui constituent la démonstration, mais c'est surtout une manière d'écrire qui prépare une transition sûre vers la rédaction d'un texte clair, rigoureux et compréhensible par le lecteur, le texte définitif des *Lettres de A. Dettonville*. Car tout abrégées qu'elles soient, les expressions sont conçues pour être transformées en une rédaction étof-

fée. Par exemple, à partir du brouillon, qui porte l'expression « 2 $\square$ bde, bde », Pascal n'a qu'à écrire « le double des carrés BD.DE, BD.DE » (BD.DE étant le produit des côtés BD et DE) pour aboutir sans difficulté à la rédaction rhétorique, débarrassée de toute expression symbolique, que l'on trouve dans les *Lettres de A. Dettonville*.

De l'avant et de l'aval de cette proposition, nous ne savons rien. À quoi servait-elle ? Quel type de problème permettait-elle de résoudre ? Elle témoigne du fait que Pascal, loin d'avoir publié toutes ses recherches mathématiques, en a conservé beaucoup, aujourd'hui détruites ou perdues. Il faut se résoudre à tout ignorer des recherches que Pascal avait entamées sur ce sujet. À moins que de nouveaux documents n'arrivent au jour, notre ignorance risque bien d'être définitive.

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Descotes, *An unknown mathematical manuscript by Blaise Pascal, Historia Mathematica*, vol. 37, n° 3, pp. 503-531, 2010.

D. Descotes, Pascal. *Le calcul et la théologie, Les génies de la science*, n° 16, 2003.



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

2011, ANNÉE INTERNATIONALE DES FORÊTS

Dans le cadre de cet événement, le Muséum vous propose des cycles de conférences et de films.

DÉTAILS SUR WWW.MNHN.FR, RUBRIQUE « ÉVÈNEMENTS »

LES COURS PUBLICS, LES JEUDIS À 18H

Assurés par les chercheurs du Muséum, ils s'adressent à tous

Cycle « Anatomie comparée » / 1^{re} partie : J.-P. Gasc

27/01 Ordre naturel et romantisme
03/02 L'intégration darwinienne et l'anatomie comparée

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

LES LUNDIS DU MUSÉUM, 18H

Cycle de conférences « La forêt : son rôle, son état, ses habitants » :

28/02 Les forêts françaises (M. Hermeline, ONF)
07/03 Forêt, climat et cycle du carbone (D. Lousteau, INRA, Bordeaux)

LE MUSÉUM FAIT SON CINÉMA ! (CYCLE DE FILMS)

Cycle de films « L'usage des forêts »

Samedi 12/02, 16h
L'homme qui plantait des arbres (animation, F. Back, Canada, 1987, 34')
Les hommes de la forêt 21 (documentaire, Julien Samani, France, 2007, 52')

Lundi 14/02, 18h
Voyage vers la forêt (expérimental, J. Staeger, Allemagne, 2008, 7')
L'origine de la pomme ou le Jardin d'Eden retrouvé (documentaire, C. Peix, France, 2009, 52')

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



LOGIQUE & CALCUL

Le Rubik's Cube : pas plus de 20 mouvements !

Le cube de Rubik est le numéro un de tous les casse-tête.

Trente ans après son invention, on continue à y jouer

et à résoudre les problèmes qu'il pose.

Jean-Paul DELAHAYE

Le cube de Rubik (ou *Rubik's Cube*) est le plus étonnant des casse-tête jamais inventés. D'abord, aucun jeu n'a suscité autant d'intérêt et conduit à la publication d'autant d'articles et de livres. Ensuite, il est difficile et intéressant pour tant des millions de gens, en donnant lieu à toutes sortes de compétitions et d'exploits... plus ou moins étranges et de plus en plus fous. De plus, il est à l'origine de centaines d'autres casse-tête mécaniques souvent aussi intéressants que lui, et qu'on peut aujourd'hui pratiquer virtuellement avec tout ordinateur. Enfin, le problème des configurations les plus difficiles a résisté pendant 30 ans et a exigé l'emploi d'un puissant réseau informatique avant qu'on en vienne à bout il y a quelques mois.

Nous allons reprendre ces quatre points et en particulier donner quelques informations sur la preuve récemment obtenue que 20 mouvements suffisent toujours pour reconstituer les faces colorées du cube.

Ingénieux mécanisme

En août 1980, dans le n° 34 de *Pour la Science*, Emmanuel Halberstadt publiait un article intitulé *Le cube hongrois et la théorie des groupes* où il décrivait le cube de Rubik et indiquait un moyen pratique de le remettre en ordre, fondé sur l'analyse de la structure mathématique associée au cube.

Cet article a été très remarqué et a eu un grand succès qui, comme partout dans

le monde, fut d'une ampleur considérable et d'une rapidité sidérante.

Le cube inventé six ans plus tôt par le sculpteur et professeur d'architecture Ernő Rubik est un bloc de 26 petits cubes rendus solidaires par un ingénieux mécanisme permettant à chaque face de 9 cubes (3×3) de pivoter autour d'un axe parallèle aux arêtes et passant par le centre de chaque face. L'emplacement du cube central, qui compléterait le tour et donnerait un empilement de $3 \times 3 \times 3$ cubes, est occupé par le système de pivots qui donne sa cohésion à l'ensemble et le met en mouvement. La configuration initiale est telle que chaque face est colorée uniformément avec six couleurs : bleu, rouge, orange, vert, jaune et blanc. En opérant quelques rotations des faces, on mélange les couleurs et le problème posé est alors de reconstituer la configuration initiale.

Quelques instants de manipulation conduisent à comprendre les premiers éléments de la structure du casse-tête.

— Les cubes centraux des faces tournent sur eux-mêmes, mais restent toujours en place ; ils déterminent donc la couleur de chaque face et permettent d'orienter le cube d'une manière fixe.

— Un cube de coin (il y en a huit) sera toujours un cube de coin. Chacun d'eux a trois faces visibles de couleurs différentes qui, en prenant en compte les centres des faces, indiquent précisément la position qu'il doit occuper dans le cube remis en ordre.

— Les 12 cubes restants sont ceux des milieux des arêtes. Ils ont chacun deux faces

visibles de couleurs différentes qui, comme pour les cubes de coin, déterminent précisément leur position dans la configuration à atteindre.

Un succès planétaire

D'apparence simple, la remise en ordre se révèle particulièrement coriace, et une fois mélangé, sans aide ou sans étude très approfondie du problème mathématique que pose le cube, vous ne réussirez jamais à le remettre en ordre. Le casse-tête est réellement difficile et son succès reste mystérieux.

On évaluait que 350 millions de cubes de Rubik ont été fabriqués et vendus depuis que les premiers exemplaires ont été proposés au public hongrois en 1977. Cela fait de lui le casse-tête le plus vendu de tous les temps, à l'exception peut-être du Taquin (dénommé aussi 15-puzzle) dont il est impossible de comptabiliser les exemplaires (fabriqués selon des milliers de modèles différents) depuis son invention en 1879. Bien que le cube de Rubik ait été copié sans vergogne par l'industrie de la contrefaçon, Ernő Rubik, l'inventeur du cube, a fait fortune grâce à son casse-tête qui lui a valu la gloire et... lui a permis de consacrer le reste de sa vie à la mise au point d'autres casse-tête.

Une multitude de livres et d'articles ont été publiés au sujet du cube, de sa théorie et des méthodes pour le résoudre. Sur Internet, un grand nombre de pages lui sont consacrées. Le nombre de cas différents

Regards

parus chaque année permet de suivre l'évolution de la cubomania des années 1980. Une bibliographie réunie par George Helms recense 719 textes en 22 langues. Il y a 14 publications en 1979, 52 en 1980, 174 en 1981, 70 en 1982, 15 en 1983. L'ouvrage de James Nourse, *The Simple Solution to Rubik's Cube*, a été le livre le plus vendu au monde pour le mois de janvier 1982. Il est resté présent au palmarès des livres les plus vendus pendant trois ans et au total plus de six millions d'exemplaires de l'ouvrage ont été commercialisés. Plus de six autres livres sur le cube de Rubik ont dépassé le million d'exemplaires.

Des compétitions de cubes de Rubik sont organisées partout dans le monde.

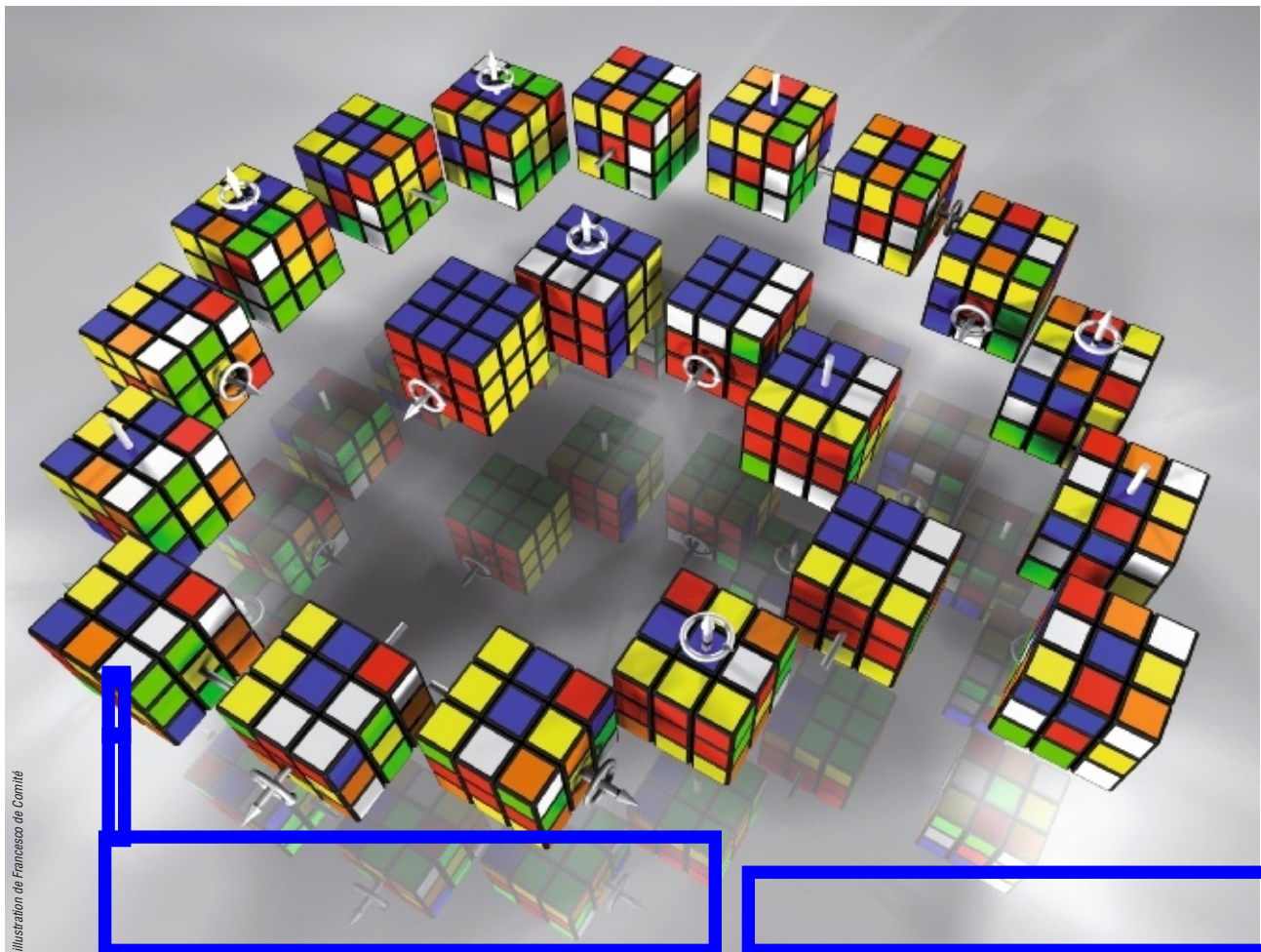
La *World Cube Association* (WCA) patronne une multitude de concours, 200 en 2010.

Les meilleurs cubistes résolvent un cube $3 \times 3 \times 3$ en moins de 10 secondes. Précisons que les règles de la WCA permettent une inspection du cube pendant 15 secondes avant que la résolution ne commence. Le champion australien Feliks Zemdegs, qui a 15 ans, établit un cube en 8,5 secondes en moyenne. Il sait aussi résoudre le cube $4 \times 4 \times 4$, beaucoup plus difficile, qui lui demande 12 secondes en moyenne, et le cube $5 \times 5 \times 5$, extrêmement difficile, qui l'occupe 68 secondes en moyenne.

D'autres exploits moins sérieux sont devenus classiques et les résultats pro-

gressent comme des records sportifs. La résolution du cube d'une seule main a demandé 14,7 secondes au champion de 2010. Avec le pied, un autre champion range un cube en 42 secondes. Le 16 novembre 2008, Milan Batick a reconstitué 478 cubes en moins de 24 heures. Il battait le précédent record qui était de 3505. Notez que M. Batick réussit donc, pendant 24 heures, l'extraordinaire moyenne de 18,05 secondes par cube !

La résolution en aveugle est fascinante. Après que quelqu'un a observé le cube, on lui bande les yeux et il résout le cube. Le total des opérations (incluant cette fois la phase d'observation) n'exige que 31 secondes à



1. VOICI LA CONFIGURATION LA PLUS DIFFICILE rencontrée lors du calcul qui a conduit à démontrer que 20 mouvements suffisent toujours pour remettre en ordre la configuration. Cette configuration est obtenue en appliquant un mouvement par

mouvement, pour remettre en ordre la configuration en 20 étapes; vous pouvez la lire et l'effectuer à l'envers pour remettre en ordre la configuration. Cette configuration est la plus difficile à votre cousin qui se croit champion du cube de Rubik.

Hiayan Zhang, le champion de 2010. Le record en nombre de cubes pour le réarrangement en aveugle est dû à l'Indonésien Muhammad Irlil Khairul Anam, qui a réussi en 2010 à établir 16 cubes en moins d'une heure (temps maximum alloué) : après une période d'observation des 16 cubes, on lui bande les yeux et il refait alors les cubes les uns après les autres.

Le plus jeune manipulateur de cube avait quatre ans quand son exploit fut homologué. Le plus âgé avait, lui, 88 ans. Pour la résolution des yeux bandés, plus difficile, les âges records sont de 10 et 60 ans.

Le succès du cube de Rubik est dû au plaisir qu'on éprouve à le manipuler. Un autre cube, composé seulement de huit petits cubes aimantés, avait été inventé quelques années avant celui de Rubik. Il constituait un casse-tête plus facile, mais du même type. Il n'est que très peu de succès, car il était trop tentant de tricher en séparant les cubes aimantés au lieu de les faire glisser. Le génie de l'invention de Rubik est plus celui d'une trouvaille mécanique que mathématique.

Parmi les plus étonnantes des variantes, le *Void Cube* est une merveille : il se pré-

sente exactement comme le cube de Rubik et permet les mêmes mouvements, sauf que tout ce qui est dans le cube de Rubik sert au fonctionnement et a disparu : il n'y a rien ni au centre du cube ni au centre des faces. Seuls persis-

tent les 8 cubes de coin et les 12 cubes des milieux des arêtes qui se déplacent vraiment dans un cube de Rubik (*ci-contre*). L'ingéniosité du mécanisme, le succès du cube, est surpassée ! Si vous voulez essayer et étudier les variantes du cube de Rubik

seul moyen d'avoir à effectuer de nombreux achats de programmes informatiques gratuits en ligne (applet) permettent de jouer virtuellement (voir en particulier : www.randishofer.ch/rubik/index.html).

Des décomptes

Il est facile de voir que 15 mouvements ne suffisent pas à remettre en ordre n'importe quelle configuration du cube de Rubik. À chaque fois que vous faites un mouvement (rotation d'une des faces du cube) vous avez 8 choix possibles, car chacune

des six faces peut être tournée de 90, 180 ou 270 degrés. En faisant un mouvement, on peut donc atteindre 18 configura-

tions. En réalisant deux mouvements, on peut atteindre au plus $18 \times 18 = 18^2$ configurations différentes. Etc. En effectuant 15 mouvements ou moins, vous atteignez donc un nombre de configurations différentes inférieur ou égal à :

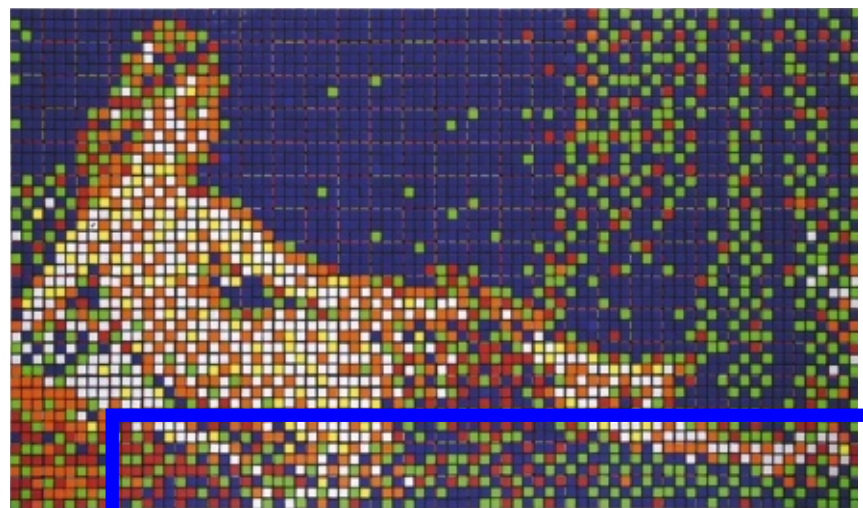
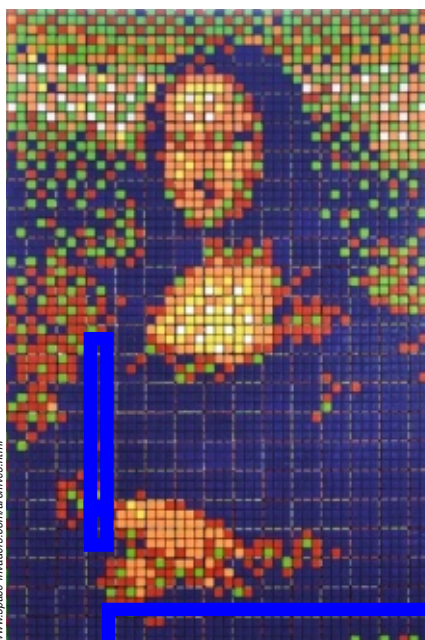
$$18 + 18^2 + 18^3 + 18^4 + \dots + 18^{15} = 7,1435 \times 10^{18}.$$

Or le nombre est inférieur au nombre de configurations du cube de Rubik, égal à $4,3 \times 10^{19}$. En faisant 15 mouvements ou moins on ne peut donc pas atteindre toutes les configurations possibles. Si on place le cube dans l'une de ces configurations non atteintes, il faudra donc au moins 16 mouvements pour remettre le cube en ordre. Un raisonnement similaire, mais un

peu plus subtil, montre que certaines configurations ne pourront être remises en ordre qu'avec 12 mouvements ou plus.

Remettre le cube, c'est bien, mais le refaire en opérant un minimum de mouvements c'est mieux et plus délicat. La WCA a prévu une épreuve qui mesure cette aptitude des concurrents à l'économie dans l'action. Les règles de l'épreuve sont les suivantes :

(a) Le joueur examine le cube mélangé qu'on lui présente et l'étudie soigneusement pendant une heure en s'aidant de crayons, de papier, de trois cubes auxiliaires et de gommettes colorées s'il le souhaite.



2. « RUBIKUBISME » : ces images sont décomposées en pavés de neuf pixels, que l'artiste réalise alors en prenant autant de cubes de Rubik qu'il faut et en les manipulant pour faire apparaître sur une des faces les différents pavés colorés de neuf pixels. Ils composent ainsi patiemment le tableau avec six couleurs. D'autres œuvres de ce type sont visibles sur www.space-invaders.com/archives.html.

(b) L'heure écoulée, il remet sa solution sous forme écrite en utilisant un codage standardisé pour indiquer la meilleure suite de mouvements qu'il a trouvée.

La longueur d'une solution est le nombre de rotations de face, une rotation pouvant être d'un quart de tour ou d'un demi-tour. Le champion 2010 est le Hongrois (tiens, tiens !) Istvan Kocota, qui a proposé une solution en 22 mouvements pour le cube mélangé qu'on lui avait soumis. Il faut noter que ce nombre est particulièrement faible, car les méthodes de reconstruction de cubes expliquées dans les livres ou les multiples pages Internet qui en décrivent conduisent à des reconstitutions en 60 mouvements environ, ou 30 pour les meilleures... qui sont plus difficiles à apprendre. Ce score de 22 n'est pas dû au hasard qui aurait fait que le problème soumis en 2010 était particulièrement simple. La preuve en est qu'en 2009, le champion de cette épreuve avait réussi lui aussi en 22 mouvements. En 2008, le record était de 27, en 2007 de 30, en 2006 de 28, en 2005 de 28. Les joueurs progressent et une question vient à l'esprit : peut-on toujours faire 22 ou moins ? Plus précisément, quel est le nombre de mouvements qu'un joueur parfait aura à faire dans le pire cas ?

Quand la théorie pureoute

Depuis longtemps, on soupçonne que la réponse est 20. En juillet dernier, la preuve du résultat en a été donnée. Puisque l'étude des mouvements du cube de Rubik se ramène à l'étude d'un certain groupe mathématique, on pouvait penser que la solution proviendrait de progrès mathématiques. La structure étudiée ne contient aucun arbitraire, contrairement par exemple au jeu d'échecs dont le graphe des parties possibles est compliqué, du fait des règles complexes. Ici la structure du problème, un graphe aussi (voir la figure 4), est définie à partir d'éléments géométriques très simples et la situation paraît donc idéale pour que les mathématiciens exercent leur talent et produisent une réponse s'appuyant sur tout ce qu'ils savent des groupes, de leur classification, de leurs



3. LES VARIANTES LES PLUS CLASSIQUES du cube de Rubik sont le cube $2 \times 2 \times 2$, le cube $4 \times 4 \times 4$ (*Rubik's Revenge*), le cube $5 \times 5 \times 5$ (*Professor's Cube*). Tous donnent lieu à des épreuves dans les compétitions de la WCA. Les plus gros, commercialisés depuis 2008, sont le cube $6 \times 6 \times 6$ (*V-cube 6*) et le cube $7 \times 7 \times 7$ (*V-cube 7*). Le nombre de configurations du $2 \times 2 \times 2$ est 3 674 160. Le nombre de configurations du $3 \times 3 \times 3$ est $4,3 \times 10^9$. Celui du $4 \times 4 \times 4$ est $7,4 \times 10^{10}$, celui du $5 \times 5 \times 5$ est $2,8 \times 10^{24}$, celui du $6 \times 6 \times 6$ est $1,57 \times 10^{116}$, celui du $7 \times 7 \times 7$ est $1,95 \times 10^{160}$. On dépasse alors le nombre de bits d'information contenus dans l'Univers visible ! Le succès de ces cubes a entraîné des dizaines de variantes ont été inventées, dont des versions en braille pour les aveugles.

4. Le graphe du cube de Rubik

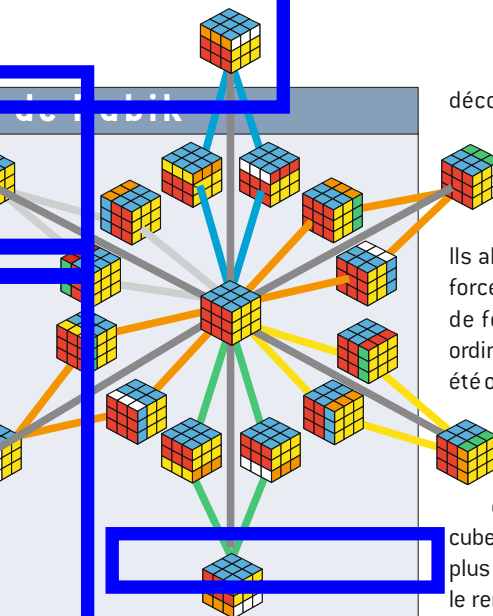
On associe au cube de Rubik le graphe de toutes ses configurations. Les nœuds du graphe sont les $4,3 \times 10^{19}$ configurations possibles. Deux nœuds sont reliés par un arc si l'on peut passer d'une configuration à l'autre en opérant un mouvement de rotation de l'une des faces du cube.

Ce graphe, impossible à dessiner en totalité, est extrêmement symétrique, car tous les nœuds sont équivalents comme c'est le cas par exemple du graphe des sommets d'un cube. Trouver les meilleures suites de mouvements pour résoudre le cube est équivalent à rechercher les plus courts chemins dans ce graphe. Trouver le nombre maximum de mouvements qu'exigent les plus difficiles des configurations est équivalent à rechercher les configurations les plus éloignées de la configuration initiale. Cette dernière, au centre du graphe, revient à trouver le diamètre du graphe (la distance maximale séparant deux nœuds du graphe).

Les algorithmes généraux de calcul dans un graphe (calcul de plus court chemin, calcul de diamètre, etc.) ne peuvent pas s'appliquer directement à cause de la taille du graphe, et cela même en utilisant les ordinateurs les plus puissants. Le diamètre du graphe a été calculé en adaptant ces méthodes et en exploitant au mieux les propriétés particulières du graphe.

L'une des idées utilisées par les chercheurs est la suivante. Pour connaître un court chemin entre deux positions A et B, on peut choisir une configuration C pas trop loin de A, puis rechercher le plus court chemin entre A et C et le plus court chemin entre C et B. La mise bout à bout des deux plus courts chemins ne conduit pas toujours au plus court chemin entre A et B, mais elle en donne un assez bon. De plus, si on fait varier C cela permet presque à coup sûr de découvrir le plus court chemin entre A et B.

Le problème du diamètre du graphe du cube de Rubik est étudié depuis 30 ans et les progrès ont été lents jusqu'à la démonstration en juillet 2010 que le diamètre est 20. Pour mesurer les progrès, voyons la date, le nom du prouveur et le diamètre entre parenthèses : juillet 1981, Morwen Thistlethwaite (52) ; avril 1993, Hans Kloosterman (42) ; mai 1993, Michael Reid (37) ; janvier 1995, Michael Reid (inférieur à 29 et supérieur à 20) ; décembre 1995, Silviu Radu (28) ; avril 2006, Sil-



Début du immense graphe des configurations du cube de Rubik.

viu Radu (27) ; mai 2007, Dan Kunkle (26) ; mars 2008, Rokicki (22) ; juillet 2010, Tomas Rokicki, Herbert Kociemba, Morley Davidson et John Dethridge prouvent enfin que le diamètre est 20.

Le tableau suivant (obtenu à l'occasion du calcul du diamètre du graphe) donne le nombre de configurations à distance d de la configuration initiale. Les dernières lignes du tableau sont des valeurs approchées en cours de calcul.

0	1
1	18
2	243
3	3 240
4	43 239
5	574 908
6	7 618 438
7	100 803 036
8	1 332 343 288
9	17 596 479 795
10	232 248 063 316
11	3 063 288 809 012
12	40 374 425 656 248
13	531 653 418 284 628
14	989 320 578 825 358
15	1 365 146 187 124 313
16 environ	1 100 000 000 000 000 000
17 environ	1 000 000 000 000 000 000
18 environ	29 000 000 000 000 000 000
19 environ	1 500 000 000 000 000 000
20 environ	300 000 000

décompositions, etc. Il n'en a rien été, la théorie pure s'est révélée inopérante ! La réponse, 20, n'a été obtenue qu'à l'issue d'une série de progrès algorithmiques s'étalant sur 20 ans. Ils aboutissent grâce à l'utilisation d'une force de calcul équivalente à 35 années de fonctionnement ininterrompu d'un ordinateur de bureau. Ce temps de calcul a été obtenu en mobilisant un ensemble d'ordinateurs prêtés par le géant Google pendant quelques semaines.

Le nombre de configurations qu'on peut obtenir en mélangeant le cube est de 43 milliards de milliards. Si en plus de le manipuler, vous le démontez et le remontez sans prendre de précautions, il y a 12 fois plus de configurations et vous n'aurez donc qu'une chance sur 12 de pouvoir le remettre en ordre. Cette propriété du cube est analogue à celle du Taquin : en démantant un Taquin et en replaçant les

pièces sans précaution, vous n'avez qu'une chance sur deux de pouvoir revenir à la position initiale.

On peut s'occuper une à une des $4,3 \times 10^{19}$ configurations possibles, en recherchant à chaque fois la meilleure suite de mouvements pour l'atteindre. Trouver la suite la plus courte de mouvements pour ranger une position donnée est aujourd'hui possible grâce aux bons algorithmes mis au point par Herbert Kociemba, qui travaille sur la question depuis 1992. Pour une position donnée, il faut souvent plusieurs secondes, même avec une machine puissante, pour identifier la suite optimale de mouvements. La recherche de la pire configuration du cube de Rubik que nous obtiendrions en calculant, pour chaque configuration, la séquence optimale de mouvements avec un algorithme traitant une configuration par seconde, exigerait donc de mobiliser pendant plus de 1 300 ans le milliard d'ordinateurs qu'il y a sur Terre aujourd'hui. La méthode brutale n'est pas en mesure de donner la réponse.

Une autre idée consiste à procéder progressivement en mémorisant ce qu'on obtient et en le réutilisant. On regarde toutes les configurations qu'on atteint en un mouvement (il y en a 18) et on mémorise leur liste avec

l'information qu'elles sont atteignables en un mouvement. Partant de ces configurations, on opère un mouvement de plus de toutes les façons possibles. On mémorise les configurations nouvelles qu'on vient d'atteindre avec l'information qu'elles sont atteignables en deux mouvements.

On poursuit de la même façon et, de proche en proche, toutes les configurations possibles se trouvent mémorisées avec l'information de la longueur du plus court chemin qui permet d'y arriver (car quand on engendre une configuration pour la première fois, c'est qu'il n'y a pas de suites de mouvements plus courtes y conduisant). Quand une étape nouvelle de calcul n'ajoute plus de configuration, on arrête l'algorithme : on est certain d'avoir toutes les longueurs des plus courts chemins et on connaît donc les configurations du cube de Rubik les plus longues à ranger.

En théorie, cette approche est bien plus rapide que la précédente, car elle exploite au mieux les résultats des calculs déjà faits qu'elle engorge petit à petit. Mais elle est toute aussi impossible à cause de la quantité de mémoire bien trop importante qu'elle exige. C'est la totalité de la mémoire de tous les disques durs des ordinateurs sur Terre, de l'ordre de 10^{24} octets, qu'il faudrait utiliser pour exécuter l'algorithme de calcul progressif de tous les plus courts chemins que nous venons de décrire !

Un exploit algorithmique

Entre trop de calculs et trop de mémoires, il fallait trouver une solution médiane. Tomas Rokicki, H. Kociemba, Morley Davidson et John Dethridge ont su faire ce travail et démontrent que 20 est le nombre de mouvements nécessaires pour ranger le cube de Rubik dans les cas les plus difficiles. La méthode résulte d'une longue recherche et de la mise au point d'une série de perfectionnements pour apprivoiser la complexité du problème et exploiter à la fois la mémoire disponible sur une machine contemporaine et la capacité de calcul qu'elle donne, en s'arrangeant pour ne jamais dépasser les bornes que la technologie fixe aujourd'hui.

Où se situe l'utilisation des symétries du problème qui permet d'en réduire un peu la taille ? L'idée a été de séparer le problème en un grand nombre de sous-problèmes que la mémoire disponible sur un ordinateur permet de traiter globalement par une méthode apparentée à celle progressive évoquée. Le problème a ainsi été découpé en 2 217 093 120 ensembles de 19 508 à 21 800 configurations chacun. L'utilisation des symétries a ramené le nombre d'ensembles à traiter à 55 882 296.

Une variante de l'algorithme de H. Kociemba exploite l'information que le pire cas ne demande pas moins de 20 mouvements. On sait depuis 1995 que certaines configurations ne peuvent être résolues en moins de 20 mouvements, et donc, dès que pour une configuration donnée, on connaît une solution en moins de 20 mouvements, et même si ce n'est pas la meilleure, on peut se dispenser d'en rechercher une plus courte.

Le calcul mené pour arriver au résultat que 20 mouvements, même dans le pire cas, suffisent à remettre en ordre un cube de Rubik, a produit d'autres informations intéressantes. En moyenne, le nombre de mouvements nécessaires est 17,7. Les configurations exigeant 20 mouvements sont assez rares : il y en a environ 300 millions, ce qui signifie qu'une configuration prise au hasard a moins d'une chance sur 100 millions de nécessiter 20 mouvements. Ces informations font maintenant comprendre que les joueurs humains qui réussissent en 22 mouvements réalisent un exploit assez lointain de l'optimum, chose remarquable. Cependant, malgré tous leurs efforts et tous les entraînements auxquels les joueurs humains se soumettent, ils ne réussissent pas à découvrir les meilleures séquences de mouvements.

Ainsi, le jeu inventé il y a plus de 30 ans a défié le monde des informaticiens qui n'ont pu que difficilement résoudre le problème de la pire configuration. Le jeu défie aussi la communauté des mathématiciens qui, sur une question simple purement algébrique, est restée à l'étroit. L'idée est de laisser la machine l'emporter en proposant un résultat qu'aucun théoricien ne peut contredire ni valider à la main.

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

J. Slocum, *The Cube, The Ultimate Guide to the World's Bestselling Puzzle*, Black Dog & Leventhal Publisher Inc., 2009.

T. Rokicki, *Twenty-two moves suffices for the Rubik's cube*, *The Mathematical Intelligencer*, vol.32(1), pp.33-40, 2010. <http://www.springerlink.com/content/q088143tn05k124/fulltext.pdf>

D. Joyner, *Adventures in Group Theory : Rubik's Cube, Merlin's Magic and Other Mathematical Toys*, The Johns Hopkins University Press, 2008.

SUR LE WEB

T. Rokicki et al., *God's Number is 20* [consulté le 11/11/2010] <http://www.cube30.org/>

Cubeland : <http://cubeland.free.fr/extra/club/>

FrancoCube : <http://www.franco-cube.com/>

Site officiel du cube de Rubik : <http://www.rubiks.com/>

World Cube Association : <http://www.worldcubeassociation.org/index.php>

Wikipedia : Optimal solutions for Rubik's Cube http://en.wikipedia.org/wiki/Optimal_solutions_for_Rubik's_Cube

ART & SCIENCE

Astronomie dans le décor... à Versailles

La reine des sciences au XVII^e siècle figure en bonne place dans les décors du château de Versailles.

Loïc MANSIN

Le château de Versailles fut résidence royale de 1682 à 1789, durant les règnes de Louis XIV, de Louis XV et de Louis XVI. On associe au palais et à la vie de ses hôtes autant de faste que de drames, tandis que le quotidien de la cour semblait fait essentiellement de divertissements et d'intrigues. Cette vision néglige la place – importante – qu'occupèrent les sciences dans la vie versaillaise. En effet, nombre de savants y présentèrent leurs travaux, y enseignèrent et purent s'y consacrer à l'étude. Plusieurs expériences spectaculaires y furent conduites, telle la décharge électrique qui parcourut, à l'instigation de l'abbé Nollet, le corps de 60 à 240 personnes (selon les récits) dans la galerie des Glaces le 24 mars 1746. Ces liens entre sciences et royaume font l'objet d'une exposition au château de Versailles.

Ces liens apparaissent notamment dans plusieurs décors du palais dont les premières extensions furent bâties à partir de 1661 et prolongement de l'« humble » demeure de Louis XIII. De fait, Jean-Baptiste Colbert, surintendant des Bâtiments depuis 1664, dirigea les programmes iconographiques des décors. Or il fut également le fondateur de l'Académie des sciences en 1666. Cette double responsabilité transparaît dans les images peintes.

Intéressons-nous au *Char de Saturne*, commandé au peintre et décorateur français Noël Coypel en 1671 (voir page ci-contre, une esquisse). Cette œuvre illustre l'un des faits scientifiques les plus spectaculaires du règne de Louis XIV, la décou-

verte de deux nouveaux satellites de Saturne. Au XVII^e siècle, l'astronomie est en plein essor, notamment grâce à la lunette astronomique de Galilée. Ainsi équipé, le savant italien met en évidence en 1610 les quatre satellites de Jupiter, qu'il dédie à ses protecteurs, les Médicis, en les nommant *Étoiles médicéennes*.

La même année, il braque son instrument vers Saturne, la deuxième plus grande planète du Système solaire après Jupiter

Aujourd'hui, on connaît environ 60 satellites autour de Saturne :

Le Char de Saturne serait submergé de nourrissons joufflus !

et observe les anneaux, sans en comprendre leur nature : il évoque une planète dotée d'« oreilles ».

En 1656, l'astronome néerlandais Christiaan Huygens, pourvu d'une lunette plus puissante (un objectif de 57 millimètres) que celle de son prédécesseur, comprend que la planète est entourée d'un anneau, qu'il pense solide et constitué de roches. Il découvre aussi un astre près de Saturne : ce premier satellite sera nommé Titan. D'un diamètre supérieur à celui de Mercure, Titan est le deuxième plus grand satellite du Système solaire, après Ganymède (autour de Jupiter), et le seul à être entouré d'une atmosphère dense.

En 1656, Huygens devient membre de l'Académie royale des sciences de Colbert et participe à la création de l'Observatoire de Paris. Cet établissement est dirigé à la demande de Louis XIV par l'astronome italien Jean-Dominique Cassini. En 1671 et 1672, ce dernier découvre deux autres satellites de Saturne, Iapet (dont l'un des hémisphères est brillant et l'autre sombre) et Rhéa. Sur le modèle de ce que fit Galilée, les deux astres furent nommés *Sidera Ludovicea* (Étoiles ludovicéennes) en hommage au souverain.

Les observations de Cassini obligèrent Coypel à modifier son projet initial. En effet, le peintre prévoyait le char du dieu Saturne, seul, tiré par des dragons. Il dut aujourd'hui au premier plan une femme entourée de trois *putti* (un *putto* est un nourrisson joufflu et moqueur) reliés par une guirlande. Ils correspondent à la planète éponyme du dieu et à ses trois satellites connus à l'époque. La guirlande de fleurs symbolise peut-être l'anneau de Saturne. Les satellites sont également représentés autour du dieu dans son char.

Précisons que le décor, destiné au plafond du salon de Saturne, est resté à l'état de projet, car la pièce a été détruite en 1678 lorsqu'il a fallu faire de la place pour la galerie des Glaces. En revanche, le plafond de la salle des Gardes de la reine est bien orné d'un *Char de Jupiter*, du même Coypel, où l'on distingue les quatre satellites-*putti*, d'une part, autour d'une femme-planète au premier plan et d'autre part, autour de Jupiter dans son véhicule tracté cette fois par des aigles.

Au XVII^e siècle, astronomie et astrologie faisaient encore bon ménage. Coypel a d'ailleurs

représenté le verseau et le capricorne, les deux signes astrologiques associés à la planète Saturne depuis Ptolémée, au premier plan de son œuvre (en bas, à gauche et à droite).

En 1665, Cassini montre que l'anneau de Saturne est constitué de plusieurs petits anneaux, séparés par des divisions, dont la plus large est depuis nommée division de Cassini (on connaît aujourd'hui 13 anneaux de matière et divisions). En 1684, il observe autour de la planète deux nouveaux satellites, nommés Téthys et Dioné.

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les satellites de Saturne n'étaient désignés que par de nombreux, de *Saturne I* à *Saturne V*. Toutefois en 1847, l'astronome britannique John Herschel, dont le père William ajouta Mimas et Encélade en 1789 à la famille des satellites de Saturne, proposa de les remplacer par les noms de Titans, des divinités primordiales géantes qui auraient précédé les dieux de l'Olympe, et dont Cronos, c'est-à-dire Saturne, est le plus connu.

Ainsi, le plafond de Coypel aurait été obsolète au bout d'une dizaine d'années, le nombre de satellites étant passé de trois à cinq. Aujourd'hui, le peintre n'aurait sans doute pas pu envisager son allégorie planétaire, car on connaît désormais plus de 60 satellites naturels (l'existence de certains est débattue) : Le château aurait disparu sous les putti...

Sciences et curiosités à la cour de Versailles, au château de Versailles, jusqu'au 27 février 2011.
<http://sciences.chateauversailles.fr>



IDÉES DE PHYSIQUE

Profiter de la houle

Les vagues transportent beaucoup d'énergie. Il n'est cependant pas aisé de la récupérer.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Les vagues qui se déchaînent sur les côtes attirent les rêveurs, les amateurs de sensations fortes et, plus récemment, ceux en quête d'énergie propre et renouvelable : ne peut-on pas tirer profit de la puissance de cette eau en mouvement, comme le fait l'usine marémotrice de la Rance, près de Saint-Malo ? Mais l'énergie des vagues ne se laisse pas facilement domestiquer : l'idée a déjà suscité près d'un millier de brevets dans le monde...

Pourquoi cette difficulté ? Commençons par analyser le phénomène des vagues. La houle a son origine dans les vents qui viennent « froter » la surface des océans : ils y amorcent des rides, qui s'amplifient jusqu'à devenir des ondulations aptes à parcourir des milliers de kilomètres sans s'atténuer.

L'énergie de la houle est en partie potentielle, en partie cinétique. L'énergie potentielle correspond au fait que l'eau n'est pas étale : de l'énergie est nécessaire pour soulever une partie de l'élément liquide au-dessus du niveau moyen et former ainsi des crêtes et des creux.

L'énergie cinétique correspond aux mouvements de l'eau. Ces mouvements, contrairement à celui des spectateurs dans la ola des stades ou celui de la membrane d'un tambour, ne se limitent pas à des oscillations verticales. La quantité d'eau présente dans une colonne d'eau varie constamment lorsque sa hauteur varie ; l'eau

étant incompressible, elle se déplace alors vers les colonnes voisines ou inversement : les mouvements horizontaux sont associés aux mouvements verticaux.

Lorsque la longueur d'onde des vagues, c'est-à-dire la distance entre deux crêtes consécutives, est inférieure à la profondeur de l'eau (on dit qu'on est en eau profonde), l'eau décrit un mouvement circulaire (voir la figure 1). À la surface de l'eau, le rayon du cercle du mouvement est égal à

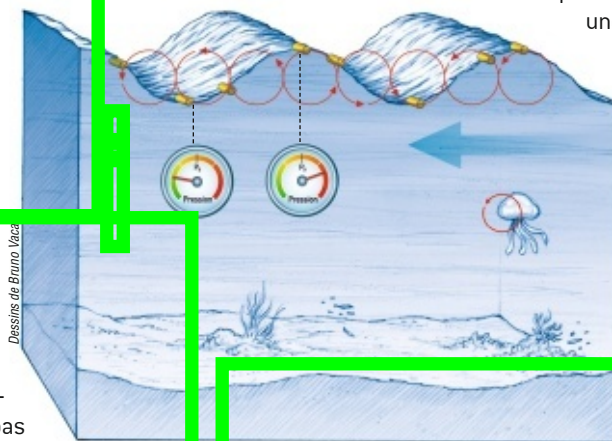
l'amplitude des oscillations, mais le diamètre du cercle décrit diminue rapidement avec la profondeur.

Une puissance considérable

Comme dans toutes les ondes linéaires, l'énergie cinétique des vagues est en moyenne égale à l'énergie potentielle. Il suffit donc d'estimer l'énergie potentielle pour connaître l'énergie totale. Prenons donc une houle de deux mètres d'amplitude.

Pour simplifier le calcul, assimilons le profil de l'ondulation à un créneau. On suppose ainsi que l'eau est abaissée de un mètre sur une demi-longueur d'onde et élevée de un mètre sur la seconde demi-longueur d'onde. Le travail mis en jeu est égal au produit de la masse d'eau déplacée par l'accélération de la pesanteur et par l'élévation ; on calcule qu'il est de cinq kilojoules par mètre carré.

Qu'en est-il maintenant de la puissance de cette houle qui avance vers la côte ? En eau profonde, la vitesse à laquelle cette énergie se propage est proportionnelle à la racine carrée du produit de l'accélération de la pesanteur par la longueur d'onde de la vague. Pour une vague de 64 mètres de longueur d'onde, on obtient une vitesse de cinq mètres par seconde. La puissance par mètre linéaire est donc d'environ 25 kilowatts. C'est considérable : multipliée par 200 kilomètres de large (cinq pour cent de



1. LA HOULE TRANSPORTE de l'énergie à la fois potentielle et cinétique. L'énergie potentielle est due aux différences de hauteur des colonnes d'eau. L'énergie cinétique provient des mouvements de l'eau, qui s'effectuent non seulement verticalement, mais aussi horizontalement. Ainsi, un bouclier qui flotte effectue un mouvement circulaire. Le rayon de ce mouvement diminue rapidement avec la profondeur. Pour produire de l'énergie, on peut par exemple exploiter les variations de pression en un point donné, la pression hydrostatique étant plus élevée sous une crête, moins élevée sous un creux.

littoral atlantique français), la puissance serait égale à cinq gigawatts, soit de l'ordre de grandeur de la puissance fournie par les éoliennes en France en 2010.

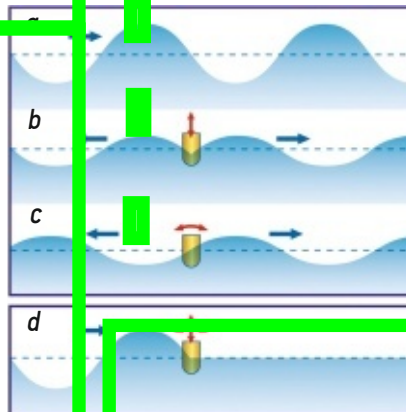
Comment récupérer cette puissance ? Généralement, l'idée est de profiter du va-et-vient des masses d'eau pour actionner un dispositif électromécanique. On a le choix entre des dispositifs étendus (projets *Pelamis* ou *Wave Dragon*) et des dispositifs plus simples qualifiés de « ponctuels », beaucoup plus petits par rapport à la longueur d'onde des vagues. Ils sont de conceptions très variées, comme l'attestent les unités *PowerBuoy* et *Archimedes* (voir la figure 3). Quelques principes physiques de base nous permettront cependant de déterminer la puissance maximale à attendre des dispositifs ponctuels.

Pour ce faire, déterminons l'énergie prélevée de la houle en analysant comment cette onde a été modifiée par la bouée. Utilisons un raisonnement analogue à celui qui permet, en optique, de déterminer l'énergie maximale absorbée par un atome dans un faisceau lumineux ; ce maximum correspond, à un coefficient numérique près, à l'énergie incidente sur une surface égale au carré de la longueur d'onde lumineuse.

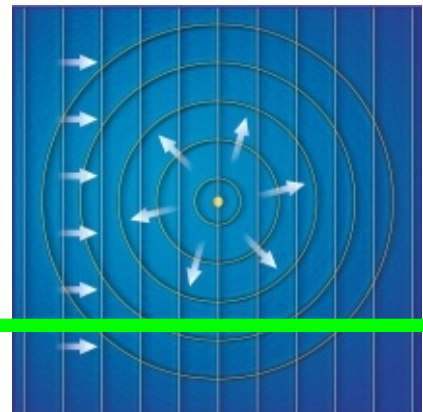
À grande distance du « capteur ponctuel », l'onde résultante est la superposition de l'onde incidente et d'une onde circulaire émise par le capteur (voir la figure 2). On observe alors deux effets : dans la direction de propagation de l'onde incidente, on a des interférences destructives entre l'onde incidente et celle émise par le capteur ; et dans toutes les autres directions il y a émission d'énergie.

Les interférences se traduisent par le fait que, sur une certaine étendue, l'amplitude de la houle est plus faible qu'elle n'aurait été en l'absence du dispositif. Ainsi, la houle transporte moins d'énergie. L'énergie prélevée est proportionnelle au produit de l'amplitude initiale de la houle par l'amplitude de l'onde émise. Et pour un effet maximal, les oscillations du capteur doivent être en opposition de phase par rapport à la houle.

Ainsi, plus l'amplitude des oscillations est grande, plus l'énergie prélevée serait



2. UNE BOUÉE QUI OSCILLE de façon appropriée peut absorber l'énergie des vagues. Le schéma de la situation à une dimension aide à le comprendre (a, houle non perturbée). Une oscillation verticale sur une surface liquide plane crée une onde symétrique (b). Une oscillation horizontale crée une onde antisymétrique (c). La superposition des trois cas de figure (houle non perturbée, oscillations verticales et horizontales de la bouée avec des amplitudes adéquates) conduit à l'absorption de l'énergie incidente (d). Le schéma de droite représente la situation en deux dimensions, vue de dessus.



important, mais c'est sans compter sur le second effet : l'onde émise par le capteur transporte une énergie proportionnelle au carré de son amplitude. La puissance réellement récupérée par le capteur est donc la différence entre l'énergie prélevée à la houle et l'énergie réémise.

Trouver le bon réglage

On doit ainsi ajuster l'amplitude des oscillations du capteur de façon à augmenter au maximum l'énergie prélevée à l'onde sans que l'énergie rayonnée ne vienne tout faire perdre. On montre que l'optimum est atteint quand la puissance récupérée est identique à la puissance émise.

Le calcul indique en outre que la puissance récupérée est alors égale à la puissance de la houle initiale qui arrive sur un segment dont l'extension est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement. Cela donnerait au plus 500 kilowatts pour une houle de deux mètres d'amplitude et ayant une longueur d'onde de 64 mètres.

Or les rendements actuels ne sont que de quelques pour cent. À cela s'ajoutent trois autres difficultés. La première est qu'en réalité, les mouvements de la surface des océans sont complexes et correspondent

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTJY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

J. Falnes, *A review of wave-energy extraction*, *Marine Structures*, vol. 20(4), pp. 185-201, 2007.

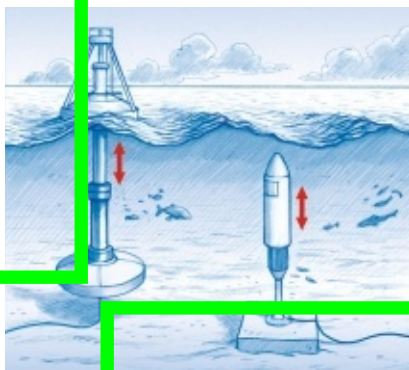
K. Budar et J. Falnes, *A resonant point absorber of ocean-wave power*, *Nature*, vol. 256, pp. 478-479, 1975.



Retrouvez les articles de J.-M. Courtjy et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

Regards

3. PLUSIEURS DISPOSITIFS produisant de l'électricité à partir de l'énergie de la houle ont déjà été testés et sont sur le point d'être exploités commercialement. L'un d'eux est *PowerBuoy*, un dispositif à flotteur conçu par la Société américaine *Ocean Power Technologies*. Un autre est *Archimedes Waveswing*, dispositif immergé construit par la société écossaise *AWS Ocean Energy*. Dans les deux cas, le va-et-vient d'un cylindre qui coulisse à l'intérieur d'un autre engendre de l'électricité par induction électromagnétique.



à la superposition d'ondes provenant de directions différentes et n'ayant pas la même longueur d'onde. À la lumière de ce qui précède, il est impossible d'avoir une récupération d'énergie maximale pour des longueurs d'onde très différentes : le processus d'optimisation sera donc au mieux

un compromis, adapté aux formes particulières de la houle du lieu d'installation.

La deuxième difficulté est que ces dispositifs doivent résister aux plus fortes des tempêtes, ce qui accroît notablement le coût de leur installation. Enfin, il reste techniquement délicat de convertir de l'énergie fournie irrégulièrement avec des temps caractéristiques de 10 secondes en énergie électrique régulée à 50 hertz (cycles de 0,02 seconde).

C'est pourquoi l'énergie de la houle, quoique propre et renouvelable, n'en est qu'au stade des expérimentations poussées. Le projet actuel le plus ambitieux, SEABASED, est la construction en Suède d'une ferme de 500 unités, ou amérises d'une puissance totale de dix mégawatts. Le projet français SEM-REV, visant à tester divers prototypes, sera quant à lui déployé en 2011 au large du Croisic. ■

Mardi 8 février 2011 à 18h30
au Palais de la Découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous faire partager leur passion pour la science !

Invité

Christophe Salomon

Directeur de recherche au CNRS, Christophe Salomon dirige le groupe « Gaz de Fermi ultrafroids » au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris. Il étudie les gaz d'atomes ultrafroids. Son équipe est aussi engagée dans la mission spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne, qui vise à envoyer en 2013, sur la Station spatiale internationale, l'horloge PHARAO à atomes froids.

Palais de la Découverte POUR LA SCIENCE

SCIENCE & GASTRONOMIE

Attention au froid !

Il fait brunir certains végétaux, qui sont alors un peu moins bons pour la santé.

Hervé This

Une pomme, une poire qui tombent se talent (le tissu végétal brunit à l'endroit du choc) à une vitesse qui dépend de l'espèce et de la variété. Pourquoi ? Parce que le choc endommage les cellules : des enzymes, initialement présentes dans des compartiments intracellulaires spécifiques du fruit, sont libérées de ces compartiments, réagissent avec des polyphénols pour former des composés nommés quinones, lesquels polymérisent en formant des composés bruns qui se lient aux protéines cellulaires.

Les cuisiniers jugent ce brunissement enzymatique des végétaux nuisible à l'appréciation de leurs plats, et ils le combattent souvent à l'aide de jus de citron... ignorant que l'acide ascorbique pur, responsable de l'effet du jus de citron, leur coûterait moins cher et serait plus efficace. Sans compter qu'il éviterait de donner un goût de citron qui n'est pas toujours souhaitable : pour les fonds d'artichaut passés, pour les avocats préparés en purée, pour les fruits coupés...

Depuis que le froid s'est introduit dans les cuisines, les chocs ne sont plus les seules causes de brunissement enzymatique : la congélation aussi conduit à des brunissements déplorables, d'origine voisine du brunissement des chocs. En effet, la congélation de l'eau, dans les tissus végétaux, crée des cristaux de glace, qui percent les compartiments intracellulaires et même les cellules.

Aujourd'hui, on explore un brunissement qui se produit au froid, même quand l'eau ne gèle pas : les ananas conservés entre 0 et 8 °C présentent parfois des taches sombres en même temps que leur chair devient plus

parente. C'est ce que l'on nomme le cœur noir de l'ananas.

Les stress associés au refroidissement conduisent à des désorganisations des cellules végétales, mais quelles sont les enzymes actives dans ce phénomène particulier ? Astrid-Kim Raimbault et ses collègues du CIRAD ont exploré le brunissement des ananas au froid... et découvert pourquoi certaines variétés ne brunissent pas : ils ont déterminé que l'activité des enzymes polyphénoloxydases est responsable du brunissement.

Les polyphénoloxydases participent aux défenses des plantes, par exemple dans leur lutte contre le froid, en renforçant les parois cellulaires par polymérisation des quinones, ce qui engendre des mélanines insolubles. Ces polyphénoloxydases ont été observées dans les variétés d'ananas sensibles au brunissement enzymatique, et la technique de l'électrophorèse sur gel (on sépare des protéines en les faisant migrer sous l'action d'un champ électrique) permet, dès un stade précoce, de savoir si une variété sera ou non sensible au froid.

Question suivante : si des quinones réactives se forment dans les végétaux endommagés ou attaqués par des insectes, par exemple, est-il bon de consommer ces végétaux ? La réponse est non. Les quinones sont très réactives et les molécules de l'organisme n'aiment pas qu'on les modifie par des liaisons covalentes : elles y perdent leur fonction. Ce qui est « naturel » n'est pas nécessairement bon ! Dans cet ordre d'idées, on a hélas vu un article essentiel publié en 1990 par Bruce Ames (le biochimiste américain qui a mis au point des tests peu coûteux pour analyser le pouvoir mutagène d'un composé).

B. Ames a comparé le risque dû aux « pesticides naturels » et celui dû aux résidus de pesticides synthétiques. Le calcul montrait que 99,99 pour cent (en masse) des pesticides absorbés par les Américains, en raison de leur alimentation, provenaient des composés utilisés par les plantes pour se défendre. À l'époque, on n'avait testé l'effet carcinogène que de 52 pesticides naturels (alors que tous les pesticides de synthèse ont très largement été étudiés), et la moitié d'entre eux étaient cancérigènes pour les rongeurs. Autrement dit, les pesticides naturels ou de synthèse présentent les mêmes dangers... et les risques que font courir les résidus de pesticides de synthèse sont bien inférieurs à ceux que font courir les pesticides naturels. B. Ames avait intitulé son article *Les pesticides de l'alimentation (99,99 % sont naturels)*.

Que manger, finalement, avec tous ces dangers ? La conclusion semble s'imposer : des fruits et des légumes sains, manipulés avec soin, protégés des insectes, avec aussi peut-être des résidus de pesticides de synthèse que l'on évite, protégés en partie du brunissement par du jus de citron ou de l'acide ascorbique... C'est du bon sens... éclairé par la science.



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



J.-M. Thinet



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ SOCIOLOGIE

Sociologie comparée du cannibalisme

George Guille-Escuret

PUF, 2010
(355 pages, 27 euros).

Premier volume d'une série de trois, cet ouvrage passionnant et d'une érudition rare apporte un éclairage nouveau sur une question peu traitée auparavant. Destiné avant tout à un public de chercheurs, il livre les résultats d'une vaste enquête visant à identifier, analyser et comparer les formes de cannibalisme pratiquées par les humains dans le monde. Selon l'auteur, ce sujet est resté jusqu'à aujourd'hui un point aveugle de la recherche en anthropologie : soit le cannibalisme était sommairement expliqué par la faim ou l'agressivité naturelle, soit il était considéré comme un mythe. Il constitue une énigme parce que cette pratique, proscrite dans toute l'aire de la civilisation occidentale, a toujours été vue comme barbare et anormale.

Ce premier tome est consacré à l'Afrique, les deux suivants traiteront l'un de l'Asie et de l'Océanie, l'autre des Amériques. Très documentée, l'enquête, à la fois

biologique, ethnographique et historique, s'appuie sur la littérature ethnologique (cannibalisme chez les grands singes notamment), sur les récits d'explorateurs ou d'anthropologues des siècles passés, ainsi que sur l'exploitation de la base de données internationale *Human Relations Area Files*, qui permet de comparer les faits sociaux et culturels à l'échelle de la planète. L'auteur montre que le cannibalisme chez les humains ne résulte pas d'une quelconque pression adaptative. Il distingue trois formes d'anthropophagie, qui ne se recoupent que rarement : l'endocannibalisme (ingestion des os par d'un parent défunt), l'exocannibalisme (consommation au cours d'un festin rituel des restes d'un ennemi) et la chasse aux têtes (ingestion d'une partie du trophée, souvent minime). Ces pratiques semblent liées à la structure sociale des sociétés considérées : endocannibalisme pour les nomades, exocannibalisme pour les sédentaires. Avec l'apparition de sociétés où le pouvoir est de plus en plus concentré (chefferies puis États), elles ont progressivement disparu, sauf dans le cas exceptionnel de l'instable empire aztèque, qui fut pris dans une course folle et destructrice. Principalement présents dans les zones forestières ou maritimes, les peuples anthropophages formaient leur culture sur une logique individuelle : ils préféraient le jardinage et l'horticulture à l'agriculture et traitaient leurs ennemis de manière personnalisée (d'où l'absence de guerres et de massacres).

Enfin, le cannibalisme doit être vu comme une réponse culturelle à des situations de crise, dans des moments particuliers de l'histoire. Dans le cas de l'Afrique, les grands royaumes ont subi des altérations sociales impor-

tantes dès les premiers contacts avec les Européens. Mais c'est surtout le développement de la traite négrière qui a favorisé l'essor du cannibalisme guerrier, qui n'existait pas jusque-là sur ce continent. En effet, certains peuples ont préféré créer l'ennemi plutôt que le réduire en esclavage, ce qui serait revenu pour eux à le domestiquer, c'est-à-dire à nier son humanité.

→ Régis Meyran

Docteur de l'École des hautes études sociales

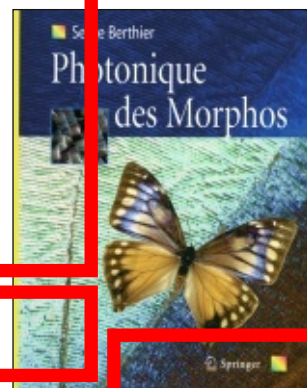
→ PHYSIQUE

Photonique des morphos

Serge Berthier

Springer, 2010
(300 pages, 110 euros).

Les grands papillons bleus que les touristes découvrent en Amazonie appartiennent au genre *Morpho*. On sait depuis longtemps que ces couleurs résultent de phénomènes optiques engendrés par les écailles qui recouvrent les ailes. Mais jamais une étude structurale et physique approfondie considérant un large échantillon d'espèces, n'en avait été faite jusqu'à ce que Serge Berthier, de l'Institut des nanosciences de Paris, ne s'investisse dans une exploration riche en découvertes. L'auteur explique que les morphos sont des « cristaux photoniques naturels ». Autrement dit, par le jeu de structures qu'il faut analyser de l'échelle du centimètre à celle du nanomètre, ces « cristaux naturels » influencent de façon extrêmement fine le jeu des photons. Or la manipulation des photons sur des distances de quelques dizaines de nanomètres constitue l'un des dé-

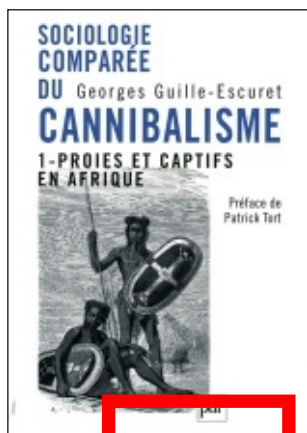


fis technologiques de notre époque. Les Morphos offrent donc un modèle biologique de première importance.

Les images en microscopie photonique et électronique (à balayage et transmission) permettent une plongée fascinante dans la structure des écailles. Une partie de l'ouvrage, présentée comme une banque de données, fait ainsi découvrir, espèce après espèce, une dimension inattendue de la « biodiversité ». Une critique au passage : le classement des espèces ne respecte pas la classification en vigueur.

Cela étant, le naturaliste trouve de l'intérêt à voir comment des techniques de pointe permettent d'étudier les propriétés optiques de structures biologiques d'une grande complexité. L'intense couleur bleue est produite par interférence entre les ondes réfléchies par un système multicouche, formé de lamelles empilées que les écailles recouvrent sur des stries parallèles, lesquelles provoquent des phénomènes de diffraction ; joue aussi l'abondance de certains pigments, les mélanines, absentes chez des morphos au bleu très pâle, voire blancs.

Serge Berthier aborde le rôle éventuel des couleurs iridescentes dans les interactions avec des congénères ou des prédateurs. D'où de nombreuses questions que



se passe-t-elle en vol, selon l'angle d'incidence de la lumière sur les ailes, et en fonction de la déformation de celles-ci ? Les méthodes physiques et la modélisation pourraient apporter beaucoup à l'ethologie. Elles sont présentées en détail par l'auteur, avec des rappels des bases théoriques. De nombreuses figures illustrent notamment les dispositifs expérimentaux, ce qui donne une image concrète de la recherche.

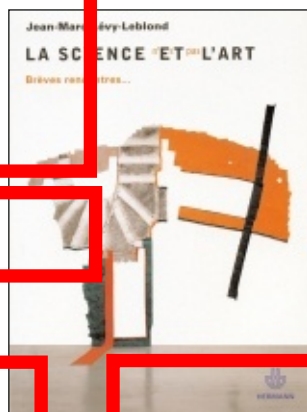
Au total, un livre pionnier, à l'interface de la physique et de la biologie, témoin d'une démarche originale qui éclaire d'un jour nouveau... la systématique des morphos, quand on s'aperçoit que, chez deux espèces, le bleu interférentiel est produit par une organisation des écailles complètement différente de celles qui prévaut chez toutes les autres !

→ Patrick Blandin

Muséum national d'Histoire naturelle, Paris

subtilité de Jean-Marc Lévy-Leblond, physicien et essayiste, passe au crible d'une critique sans concessions les arguments habituellement cités pour rapprocher la science et l'art.

« Il paraît du Beau dans la science, ce qui la rapprocherait *ipso facto* de l'art. » Mais n'est-ce pas là se payer de mots ? Jean-Marc Lévy-Leblond passe en revue les divers liens possibles entre la science et le beau. Ses conclusions obligent à sortir des sentiers



→ ART ET SCIENCE

La science n'est pas l'art

Jean-Marc Lévy-Leblond

Hermann, 2010
[120 pages, 24 euros].

La thématique « art et science » est l'un des poncifs de la modernité. Le paysage culturel contemporain est envahi de livres, d'expositions, de magazines, de conférences, de sites internet abondant tel ou tel aspect de cette thématique. Cet essai a l'immense et rare mérite de faire rentrer une grande bouffée d'air frais dans un débat trop souvent convenu, et de nous obliger à mettre en question les fondements des rapprochements possibles entre art et science. Avec talent et

baïus. L'idée classique d'une beauté inhérente des sciences formelles est sans doute noble et rassurante, mais elle n'est pas toujours féconde et ne repose finalement sur aucun fondement. La science la plus contemporaine (et les grandes institutions qui la financent) essaie de séduire l'« honnête homme » par une abondante iconographie scientifique : splendides images astronomiques, fascinantes représentations du monde microscopique, séduisantes visualisations en fausses couleurs de structures mathématiques, etc. Mais cette « iconographie méliodique » est trompeuse, car ce n'est pas celle qui fait la substance d'un travail scientifique. D'où la mise en garde de Jean-Marc Lévy-Leblond : « La science, à trop vouloir, ne mettrait-elle

pas finalement en danger sa capacité à faire savoir ? »

Et qu'en est-il de la stimulation que certaines structures mathématiques ou physiques ont apportée à certains artistes ? Le fameux « nombre d'or » n'est-il pas sous-jacent à la structure spatiale d'un grand nombre d'œuvres plastiques, du parthénon à *La Grande Latte de céramique* ? Certains artistes n'ont-ils pas transformé des objets mathématiques en œuvres d'art ? Là encore, Jean-Marc Lévy-Leblond nous oblige à aller au-delà de l'évidence première, et du confort du consensus mou. Il nous met en garde contre un « prétendu syncrétisme entre art et science » et insiste sur leurs irréductibles différences, car il souhaite « éviter à la science le ridicule du geai qui se pare des plumes du paon, et plus encore épargner à l'art le pathétique du paon qui emprunterait ses plumes au geai ». Par essence, « là où l'art joue sur l'instabilité et l'ouverture, la science cherche la stabilité et le mouvement ».

Mais alors, s'il est « illusoire [...] d'espérer un parallélisme ou même une convergence entre arts et sciences », faut-il renoncer à toute interaction entre ces deux domaines de l'humanisme moderne ? L'auteur ne va pas aussi loin, et conclut son essai par plusieurs illustrations de ce qu'il appelle des « brèves rencontres, où telle œuvre d'art entre en résonance momentanée avec tel travail de science, sans pour autant que se confondent les chemins de l'artiste et du scientifique ». Ce dernier chapitre est le plus original et le plus novateur. À travers une série d'exemples d'œuvres de plasticiens contemporains, Jean-Marc Lévy-Leblond illustre la possibilité d'« dialogues » entre certaines œuvres d'art et certains aspects de la science. Ces homologues respectent les différences

Brèves

SCIENCES ET CURIOSITÉS À LA TOUR DE VERSAILLES

Béatrice Sauval et Arminon (sous la dir.)
RMN, Château de Versailles, 2010
(280 pages, 45 euros).

Jeu d'eau, ménagerie, potager, cabinets de curiosités, éducation des princes, instruments de mesure : dans cet ouvrage richement illustré, historiens des sciences et conservateurs évoquent les multiples liens qu'entretenait la cour de Versailles avec les sciences.

VOYAGE DANS L'ANTHROPOCÈNE

et Laurent Carpentier
Actes Sud, 2011
(168 pages, 19,80 euros).

Le constat fait ici, on le connaît : réchauffement climatique, surpopulation, planète en danger... Mais dans les pages du paléontologue Claude Lurier, il prend une autre dimension. Au fil de ses explorations polaires, l'accélération sans précédent du phénomène devient tangible. Ce petit ouvrage qui se lit comme un roman finit le 21^{ème} siècle non comme un crépuscule, mais comme une nouvelle ère géologique dont nous sommes les héros.

PALÉOBIOSPHERE

Patrick de Selys
MNHN, Société géologique de France, Lambert, 2010
(796 pages, 40 euros).

L'épave de fossiles nourrit des champs de recherche aussi variés que l'analyse des relations biosphère-géosphère, la datation des roches, la phylogénétique ou l'étude de la biodiversité. À travers ces travaux, les paléontologues ou géologues, dressent de notre planète un portrait original et didactique qui fourmille d'informations.



LES ORFÈRES DE LA LUMIÈRE

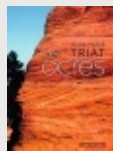
Vincent Moncorné
Éditions Pommier, 2010
(140 pages, 25 euros).

Le rayonnement produit par le synchrotron SOLEIL à Gif-sur-Yvette a de très nombreuses applications. De photographies à la médecine, en passant par les sciences de la vie, ce livre nous fait visiter l'installation et découvrir la recherche qui y est faite.

LA TERRE D'UN CLIC

Jacques Arlaud
Odile Jacob, 2010
(195 pages, 11 euros).

La surveillance, « nous le savons, court tous les dangers d'être accaparée par une idéologie, voire d'en être une », écrit l'auteur, un dominicain devenu le chargé de mission sur la dimension éthique des activités spatiales au CNES. L'observation satellitaire de la Terre est aujourd'hui omniprésente, nous n'avons jamais été autant surveillés, souligne-t-il avant d'en discuter les tenants et aboutissants techniques.



LES OCRES

Jean-Marie Triat
CORS Éditions, 2010
(128 pages, 25 euros).

Roche composée d'argile pure, mais pigmentée de minéraux ferrugineux, l'ocre est employée par les hommes depuis le paléolithique. L'auteur, qui a effectué toute sa carrière à l'Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille, nous raconte l'histoire de cette utilisation. Techniques et précisions sont d'un accès d'autant plus facile qu'ils sont efficacement illustrés de photographies et de peintures où la magnifique matière de l'ocre du Lubéron ou d'ailleurs dans le monde se reconnaît partout.

profondes entre art et science, mais montrent comment l'art peut parfois aider à retrouver l'épaisseur du monde que la science aplatit.

Précisons qu'au-delà de son intérêt intellectuel constant et de la richesse de son contenu, ce petit livre bénéficie d'une belle iconographie. Une cinquantaine de reproductions d'œuvres d'art en couleur illustrent à merveille son propos. Regrettons cependant que le point de vue salutairement iconoclaste de Jean-Marc Lévy-Leblond n'ait fait faire l'impasse sur certaines fructueuses rencontres, d'un type plus conventionnel, entre art et science. Par exemple, l'interaction entre, d'une part, le graveur Maurits Cornelius Scher et, d'autre part, les mathématiciens Harold Scott Macdonald Coxeter et Roger Penrose (son père Lionel), mais aussi les interactions qui se tissent au sein de certains centres de recherche américains entre les scientifiques et les artistes invités à séjourner dans un milieu académique et tant qu'« artists in residence ».

→ Thibault Damour

Institut des hautes études scientifiques, Paris

COSMOLOGIE

Le sens de l'Univers

Jean-François Robredo
PUF (Science, histoire et société), 2010
(111 pages, 16 euros).

Jacques Merleau-Ponty (1908-2002) est sans conteste le philosophe français à avoir le plus profondément réfléchi à l'évolution de la cosmologie. Son œuvre éclaire singulièrement cette discipline qui a longtemps

me une véritable science. En analysant en détail sa pensée, Jean-François Robredo offre donc une réflexion qui s'adresse à toute personne s'intéressant à la cosmologie, qu'elle connaisse ou non l'œuvre de Merleau-Ponty.

Ce dernier a fait irruption dans le champ de la philosophie des sciences en publiant en 1965 sa *Cosmologie du XX^e siècle. Étude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*. Dans cette étude magistrale, Merleau-Ponty cherchait à comprendre la portée, tant scientifique que philosophique, de la « révolution cosmologique » du XX^e siècle. Dans son œuvre ultérieure, il n'aura de cesse d'approfondir le sens de cette évolution de la cosmologie en la situant dans la longue durée de l'histoire des sciences, tout en continuant à intégrer sa réflexion les dernières avancées d'une cosmologie en plein essor.

S'il a vu la « révolution cosmologique » débuter au XX^e siècle, c'est que l'état de l'univers conçu comme un tout devient de nouveau légitime, grâce d'abord à la relativité générale d'Albert Einstein et, ensuite, aux progrès de l'observation extra-galactique. L'avènement de la science moderne au XVII^e siècle avait pour tant marqué le crépuscule de la cosmologie puisque la physique classique affirmait qu'il était nécessaire d'en rester au niveau local sans passer au niveau global (chez Newton, l'étude du mouvement d'un objet ne passe par aucune conception globale du cosmos, ce n'était le cas chez Aristote par exemple). Du coup, entre le XVII^e et le XIX^e siècles, scien-



tifiques et philosophes avaient construit une doctrine de la « doctrine ignorante cosmologique ». Mais la cosmologie relativiste allait montrer que l'élaboration d'une conception globale est finalement nécessaire pour donner un sens aux multiples explications locales. Restait à donner un sens à la question de l'origine qui émergeait avec le modèle du Big Bang. Merleau-Ponty souligna alors que la question du sens scientifique de l'instant initial aboutit à un non-sens puisque la singularité n'a tout simplement pas de signification en physique. L'univers des Modernes n'est donc pas un cosmos comme celui des Anciens mais un quasi-cosmos puisque la rationalité scientifique se déploie désormais sur fond d'ignorance.

On peut féliciter l'auteur pour son travail exégétique qui rend claire une aussi importante pensée que celle de Merleau-Ponty. On regrettera seulement d'en avoir pas cherché à en déceler les éventuelles limites ou insuffisances.

→ Inomas Lepertier

Université d'Oxford



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :

www.pourlascience.fr