SCIENCE

NUMÉRO SPÉCIAL

POUR LA SCIENCE

Novembre 2010 - n° 397 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le temps

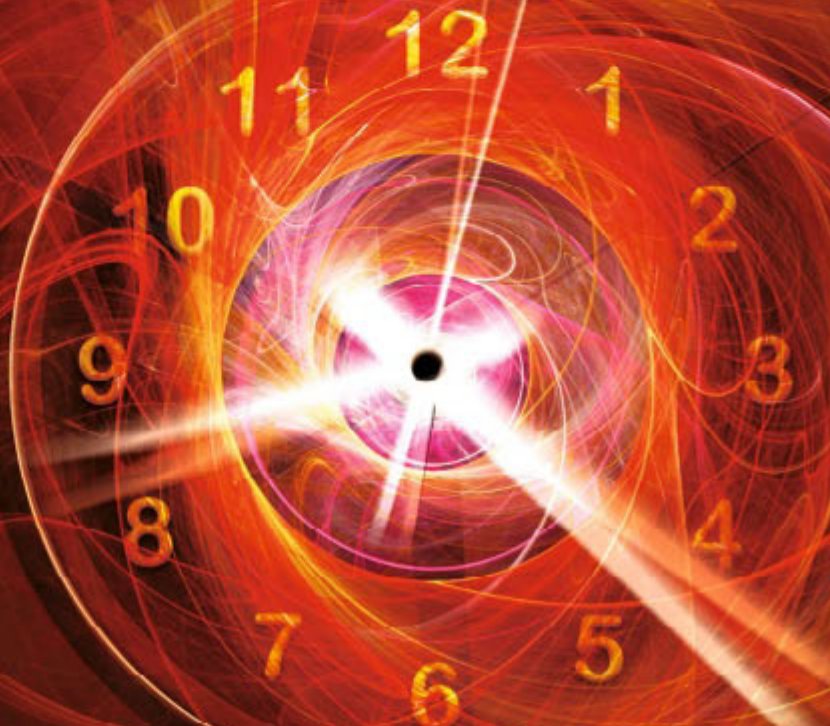
Est-il une illusion ?

Condamné
par la relativité

Sauvé
avec la physique statistique

Infini
dans l'Univers vieillissant

Distordu
par le cerveau



M 02687 - 397 S - F: 6,50 €

Bel-Lux-Ital-Port : 7,50 euros – CH : 12,9 CHF – All : 9,90 euros – Maroc : 68 MAD - Réunion : 9,80 euros – DOM Surf : 7,70 euros – TOM Surf : 1000 CFP – Nouvelle Calédonie avion : 1800 CFP – Polynésie française avion : 1900 CFP – Canada : 10,25 CAD

CONNEXIONS R&D
COSMETIC VALLEY

30 NOVEMBRE 2010 - ORLÉANS

IRD d'Orléans - 5, Rue du Carbone / Technoparc - 45072 Orléans cedex 2

La Cosmetic Valley organise la 1ère convention de rencontres et d'échanges entre les laboratoires de la recherche publique et les industriels de la filière cosmétique

- DES RENDEZ-VOUS ENTRE LES PARTICIPANTS
- DES ATELIERS SUR LES GRANDES THÉMATIQUES DE LA RECHERCHE EN COSMÉTOLOGIE

L'environnement industriel et académique français, en particulier sur le territoire de la Cosmetic Valley, possède des expertises inégalées dans les domaines de la recherche en cosmétologie : chimie, physico-chimie, biologie, packaging, formulation...

COSMETIC VALLEY FRANCE

- 550 entreprises : Dior, L'Oréal, Guerlain, Hermès, Lancaster, Clarins, Chanel, Paco Rabanne, Shiseido, Yves Saint Laurent... dont 90% de PME
- 47 000 emplois - 11 milliards € de CA
- 7700 chercheurs au sein de 6 universités, du CNRS, de l'INRA
- 50 projets de recherche collaboratifs labellisés

MODE D'EMPLOI DES CONNEXIONS-R&D

1 Vous vous inscrivez sur le site www.connexions-rd.com
2 Vous choisissez les ateliers thématiques qui vous intéressent
3 Vous programmez des rendez-vous avec les laboratoires publics et entreprises de votre choix

ENTREPRISES :

- accédez à de nouvelles compétences scientifiques,
- présentez vos activités et vos défis aux acteurs de la filière,
- initiez des projets de recherche en partenariat.

LABORATOIRES PUBLICS :

- présentez vos activités de recherche,
- découvrez les défis industriels de la cosmétologie,
- relevez les défis en collaboration avec les industriels.

INFORMATIONS PRATIQUES

30 novembre 2010
IRD d'Orléans - 5, Rue du Carbone / Technoparc - 45072 Orléans cedex 2

DROITS D'INSCRIPTION

- Entreprise membre Cosmetic Valley ou SFC : 100 euros / non membre : 150 euros
- Laboratoire public membre Cosmetic Valley ou SFC : 40 euros / non membre : 60 euros

Société Française de Cosmétologie — UNIVERSITÉ D'ORLÉANS — ADEL AGENCE DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE DU LOIRET

EN PARTENARIAT AVEC

Inscription sur **www.connexions-rd.com**
contact@connexions-rd.com

COSMETIC VALLEY FRANCE

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr

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

POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction - Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Pour la Science :
Rédacteur en chef adjoint : 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 :
Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho :
Rédactrice : Émilie Auvrouin

Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe

Marketing : Heidi Chappes
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Alban Bensa, Pascal Derkinderen, Serge Jacquot, Aurélien Moncomble, Didier Néraudeau, Christophe Pichon, Jean-Claude Rivierre, Catherine Rougeot, Philippe Valet.

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 Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Adresse postale :
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de dossiers ou de magazines :
02 37 82 06 62 (de l'étranger : 33 2 37 82 06 62)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1279 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

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

OJD PRESSE PAYANTE 2009

Une valse à... pas de temps

« Le temps s'en va, le temps s'en va, madame,
Las ! le temps non, mais nous nous en allons. »
Pierre de Ronsard, *Continuation des Amours*

Prendre son temps, perdre son temps, avoir le temps ou ne pas en avoir, le temps de vivre, le temps d'aimer... Le temps file, insaisissable, à peine perçu, déjà passé. Les expressions évoquant le temps sont légion, et cette omniprésence masque une difficulté déjà soulignée par saint Augustin, qui disait savoir fort bien ce qu'est le temps, jusqu'à ce qu'on lui demande de l'expliquer. Le temps est aisé à percevoir, mais difficile à définir.

Il est des évidences concernant cet objet indéfinissable. Le temps passe vite en bonne compagnie et s'étire quand on s'ennuie ; le temps d'avant est assimilé au « bon vieux temps », car le cerveau agit comme un filtre positif qui estompe les souvenirs des événements négatifs ; le temps semble se contracter quand on est très occupé, etc. Personne ne les remet en question. Mais il est aussi des évidences contestées. Non pas par quelque sceptique qui ferait profession de remettre en cause tout ce qu'on tient pour avéré, mais par les scientifiques eux-mêmes. Ainsi en va-t-il précisément de la notion même de temps qui, malgré la perception intuitive que nous en avons, ne serait qu'une illusion.

La relativité a condamné le temps.

Les physiciens le considèrent comme une grandeur *ad hoc* qui fut très utile à la physique newtonienne, pertinente dans notre environnement proche. Mais, dès 1915, la théorie de la relativité d'Einstein a condamné le temps... et nous n'en avons pas encore bien pris conscience. Pour certains, le temps n'existe pas. Il ne serait qu'une propriété émergente des ingrédients élémentaires du monde, tout comme la matière est solide bien qu'elle soit constituée d'atomes qui ne sont essentiellement que... du vide.

Le temps a un statut particulier par son omniprésence en physique, biologie, psychologie, ethnologie, musique, chacun en donnant sa propre définition. Cette multitude de temps renforce l'idée que l'on est incapable d'en donner une définition universelle. Mais ce flou est fécond, tant en sciences par les recherches qu'il suscite, qu'en littérature : de *À la recherche du temps perdu* de Marcel Proust au *Temps du mépris* d'André Malraux, le temps inspire les écrivains et les poètes qui chantent la fuite du temps. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à une accélération de cette fuite du temps due à l'excès d'informations, d'images, de courriers électroniques, d'appels téléphoniques qui nous assaillent. Nous n'avons plus le temps... Mais qu'importe puisqu'il n'existe plus !

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **Le masque équestre de Crosby Garrett**

6 **Détecter la maladie de Parkinson avant l'apparition des symptômes**

8 **Le coucou joue la montre**

10 **Un superamas de galaxies dans le fond diffus**

12 **Les prix Nobel 2010**

... et bien d'autres sujets.

14 ON EN REPARLE

Opinions

18 POINT DE VUE
Pour une approche moins restrictive de la biodiversité
Guillaume Lecointre

19 ÉCONOMIE
Perversités bancaires
Ivar Ekeland

20 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Réduire la pollution par les médicaments
Jean-Marie Haguenoer

22 COURRIER DES LECTEURS

24 VRAI OU FAUX
Les hommes ont-ils de la cellulite ?
Bénédicte Salthun-Lassalle

26 REPÉRAGE
Les jalons du temps

Le temps

Est-il une illusion ?

28 PHILOSOPHIE
L'instant présent unique, mais banal
Étienne Klein

34 PHYSIQUE THÉORIQUE
Le temps est-il une illusion ?
Craig Callender

42 PHYSIQUE THÉORIQUE
La disparition du temps en relativité
Marc Lachièze-Rey

50 PHYSIQUE THÉORIQUE
S'affranchir du temps
Carlo Rovelli

56 PHYSIQUE
Le paradoxe de l'irréversibilité
Roger Balian

64 PHYSIQUE DES PARTICULES
Du sens du temps à la violation de la symétrie CP
Marie-Hélène Schune

72 PHYSIQUE
Mesurer le temps avec des atomes
Christophe Salomon

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

84 LOGIQUE
Les paradoxes temporels
Philippe Boulanger

88 PHYSIQUE THÉORIQUE
Peut-on créer une machine à remonter le temps ?
Paul Davies

94 COSMOLOGIE
L'Univers aux limites de l'éternité
Alain Riazuelo

102 BIOLOGIE
Les horloges de l'évolution
Emmanuel Douzery et Frédéric Delsuc

108 BIOLOGIE MOLÉCULAIRE
Au rythme du jour et des saisons
P. Bourgin, É. Challet, M.-P. Felder-Schmittbuhl et V. Simonneaux

116 NEUROBIOLOGIE
Une horloge dans le cerveau
V. Pouthas, L. Casini et F. Vidal

122 NEUROSCIENCES
Souvenirs et émotions façonnés par le temps
Marion Nouhliane

128 ETHNOLOGIE
Le temps, d'une culture à l'autre
Éric Navet

136 ARCHÉOLOGIE
Le temps double de l'Égypte ancienne
Jan Assmann

Regards

142 HISTOIRE DES SCIENCES
La mission jésuite en Chine : tempêtes, science et politique
Isaïa Iannaccone
Au XVIe siècle, le jésuite italien Matteo Ricci et 13 confrères embarquaient pour la Chine. S'ils ne convertirent pas les Chinois au christianisme, ils leur transmirent de nombreux savoirs occidentaux en astronomie, mathématiques et géographie.

146 LOGIQUE & CALCUL
L'ensemble de tous les ensembles
Jean-Paul Delahaye
L'ensemble de tous les ensembles est généralement considéré comme un concept contradictoire. Il s'agit là d'une erreur, parmi les plus répandues au sujet des ensembles, que les logiciens dénoncent.

152 ART & SCIENCE
Le Maître des jeans
Loïc Mangin

154 IDÉES DE PHYSIQUE
Les hologrammes, du vrai 3D
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

157 SCIENCE & GASTRONOMIE
Ces recettes parfois superflues
Hervé This

158 À LIRE

Rendez-vous sur POUR LA SCIENCE.fr

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

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

www.pourlascience.fr

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commande de livres et abonnement pages 136 et 137.
Encarts jetés La salamandre et encarts jetés Universalis
En couverture : © Shutterstock

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

DOPAGE PROFESSIONNEL

L'alchimie en a rêvé, les jeux Olympiques l'ont fait. Quand un vainqueur est déclassé pour dopage, les suivants voient se transmuter le métal de leur médaille : l'argent devient or, le bronze devient argent, l'accessit devient bronze.

En sport, les vrais perdants ne sont pas ceux à qui la coupe échappe, mais ceux qu'on bannit. Soit, comme jadis, pour professionnalisme. Soit, comme maintenant, pour dopage.

D'une époque à l'autre, demeure l'hypocrisie. La plupart des amateurs de haut niveau, jadis, exerçaient une profession plus ou moins fictive et étaient sportifs à temps plein. Pour donner du crédit à la fable de l'amateurisme, on débusquait de temps en temps un amateur qui avait gagné de l'argent au moyen de son sport, on faisait semblant de croire qu'il était seul en son genre, et on l'accablait du nom de tricheur. Aujourd'hui, l'hypocrisie porte sur le dopage. On fait semblant de croire que les sportifs sont « propres ». Pour donner du crédit à cette fable, on débusque de temps en temps un sportif positif, et on l'accable du nom de tricheur.

L'hypocrisie perdure parce qu'elle aide le sport à se sortir d'une contradiction. Le sport est un combat, donc doit être cruel. Mais c'est un combat qui se prétend policé. Il ne va pas jusqu'au bout. On ne met pas à mort ceux qui ont perdu, on ne pille pas leurs biens. C'est contre ceux qui sont pris que trouve à s'assouvir l'éternelle cruauté humaine : jadis, faux amateurs ; aujourd'hui, dopés. La maxime « Malheur aux vaincus ! » garde ainsi son actualité.

DIALECTIQUE MOLÉCULAIRE

Pour être commercialisé avec succès, un produit (disons un cosmétique) doit contenir une molécule miracle. Imaginons, par exemple, un emballage annonçant : « Contient de l'arkaben. » Sauf erreur, il n'existe rien portant ce nom-là. On ne risque donc pas de se voir contredit si on prête à l'arkaben des vertus mirifiques : personne ne peut faire d'expérience montrant qu'il ne les a pas. Personne non plus ne peut prouver que le produit ne contient pas d'arkaben. L'expressivité du terme (mélange d'exotisme, avec son *k*, et de sérieux chimique, avec sa finale en *ben* comme paraben) et la force de conviction émanant du texte sur l'emballage assureront le succès du produit. Inventer une molécule nouvelle et efficace est difficile, mais rédiger un texte dithyrambique pour vanter les mérites d'une molécule inexistante est facile (ce qui prouve au passage que la littérature est la plus simple de toutes les activités).

Au bout de quelques années, inévitablement, des rumeurs naîtront sur la nocivité de l'arkaben ; la presse mentionnera une étude scientifique ayant établi un lien possible entre cette molécule et telle forme de cancer ; les autorités se feront rassurantes et affirmeront qu'il faut attendre des études plus poussées. Le fabricant, lui, n'attendra pas. Sans rien changer à la composition de son produit, mais en lui donnant un nouveau nom, il fera imprimer sur l'emballage, en grosses lettres : « Garanti sans arkaben. » Et le public se précipitera pour l'acheter.

QUEL SAVOIR-MOURIR !

La moindre des choses, quand on a du savoir-vivre, est de le conserver jusqu'à la mort. En l'occurrence, le savoir-vivre consiste à faire tout son possible pour atténuer le chagrin des proches. Voici, à titre de suggestions, cinq façons de s'y prendre. Drôles ou instructives, elles ont de quoi distraire les proches endeuillés.

Craignant de se faire empoisonner, le logicien Gödel s'abstint de toute nourriture et mourut d'inanition.

L'empereur chinois Xianzong (IXe siècle) s'attacha à la recherche de drogues d'immortalité ; sa mort est attribuée aux conséquences des substances qu'il absorba dans cette perspective (voir *Spectacles curieux d'aujourd'hui et d'autrefois*, Pléiade, note 1, p. 113).

Le philosophe Chrysippe de Tarse « mourut, à la lettre, de rire en voyant un âne manger des figues dans un bassin d'argent » (Victor Hugo, *L'Art et la science*, IV).

Le mathématicien Chasles mourut étouffé par de la guimauve – à moins que ce ne soit d'indigestion pour en avoir trop mangé (les versions diffèrent).

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Citons enfin Stendhal, mû par une ironie vengeresse contre les savants : « Le célèbre Legendre, géomètre de premier ordre, recevant la croix de la Légion d'honneur, l'attacha à son habit, se regarda au miroir et sauta de joie. L'appartement était bas ; sa tête heurta le plafond, il tomba à moitié assommé. Digne mort c'eût été pour ce successeur d'Archimède ! » (*Vie de Henry Brulard*, chap. 24).

GÉNÉRALITÉS : ATTENTION AUX EXCÈS !

Quand j'énonce une généralité, je parle de ce que je ne connais pas. Par exemple, si je dis (généralité scientifique) : « Lorsqu'on lâche une pierre, elle tombe », je n'ai pas assisté aux milliards et milliards de fois où des gens ont lâché, lâchent, lâcheront, une pierre. Je prétends pourtant savoir à quoi leur geste mène. De même, si je dis (généralité philosophique) : « L'homme naît bon, la société le pervertit », j'affirme ce qu'il en est d'hommes que je n'ai jamais vus.

Quand j'énonce une généralité, je révèle les limites de mon imagination : à force de voir les pierres tomber, je n'imagine plus qu'elles puissent ne pas le faire ; attendri par les bébés, je n'imagine pas que le mal soit déjà en eux. Dans le premier cas, mon défaut d'imagination ne restreint pas ma prise sur la réalité. (Sur Terre, du moins : peut-être existe-t-il, aux confins de l'Univers, un astre où les lois de la physique sont autres et où les pierres lévitent.) Dans le second cas, il est vraisemblable, au contraire, que mon imagination insuffisante me joue un tour. La généralité qu'elle m'amène à énoncer est douteuse, et n'aide ni à agir ni à comprendre.

Les généralités philosophiques sont souvent contestables, parce qu'elles semblent dictées par le manque d'imagination de leur auteur. Les généralités scientifiques sont moins sujettes à cette limitation. Si bien que la science pourrait être caractérisée comme un domaine où parler de ce qu'on ne connaît pas est légitime.

Archéologie

Le masque équestre de Crosby Garrett

Mis au jour non loin du mur d'Hadrien, en Grande-Bretagne, un masque de parade de cavalier romain est exceptionnellement bien conservé.

Christies

Landesmuseum Straubing

Un masque flanqué d'un casque en forme de bonnet phrygien *(à gauche)* a été découvert en Grande-Bretagne. Il est particulièrement bien conservé. Détail rare, un griffon posant une patte sur une amphore orne son sommet *(au centre)*. Datant du IIIe siècle, ce masque de parade de cavalier romain est en bronze, mais le visage a été recouvert d'argent. Ce dernier est de type grec classique, alors que d'autres masques-casques comparables, notamment ceux trouvés à Straubing en Bavière *(à droite)*, présentaient des visages orientaux, reflétant la diversité du recrutement des cavaliers romains.

Anno CCXLVIII (248). Une unité de cavalerie *(ala)* est inspectée près de la frontière Nord de la *Britannia*. Les cavaliers romains défilent cuirassés et vêtus de rouge, lance et bouclier aux poings. Les plus riches d'entre eux ont coiffé leurs masques de parade, dont les visages d'argent fascinent un petit garçon qui assiste au spectacle depuis la route. Profitant de l'inattention des légionnaires qui se reposent à l'issue de la parade, il vole le plus beau masque et le rapporte chez lui. Son père, épouvanté par le larcin de son fils, enfouit immédiatement l'objet.

Pour imaginaire qu'elle soit, cette anecdote est plausible, car à Crosby Garrett au Sud du mur d'Hadrien, l'ancienne frontière fortifiée romaine, un jeune homme équipé d'un détecteur de métaux vient de découvrir 67 fragments d'un masque de parade de cavalier romain en bronze. Restauré avant même d'avoir été étudié, il vient d'être mis en vente chez *Christies*… Si tout allait pour le mieux dans le royaume de (Grande)Bretagne, une telle trouvaille serait préservée dans un musée, mais la loi britannique ne réserve ce sort qu'aux trésors… en or ou en argent. Les conservateurs et archéologues britanniques sont atterrés, car ce masque de parade est l'un des mieux conservés au monde.

L'objet, d'une quarantaine de centimètres de hauteur, a été forgé dans un bronze, et comporte un casque en forme de bonnet phrygien complété par un masque facial représentant un visage d'homme de type grec, glabre et entouré de trois rangées de boucles. Le visage était sans doute couvert d'argent, les cheveux et le casque apparaissant dans la couleur naturelle du bronze. Tandis que de fins sourcils sont évoqués par une rainure martelée, les paupières sont bien formées et les iris représentés par des anneaux. Les narines sont percées et les lèvres très légèrement séparées. La forme de bonnet phrygien du casque est exceptionnelle, tout comme le griffon à la patte relevée posé sur l'amphore qui orne le sommet.

D'autres casques de parade ont été mis au jour, de l'Algérie à l'Allemagne, avec une forte concentration le long de la frontière romaine continentale (le *limes*) qui reliait les Pays-Bas à la vallée du Danube. Le trésor du fort de Straubing en Bavière, par exemple, est un cas intéressant, car trois visages de ses six casques sont orientaux et les trois autres classiques. Le casque de Crosby Garrett est manifestement de type classique, bien que sa forme phrygienne le relie à l'Orient.

En Grande-Bretagne, les conservateurs du musée cumbrien d'art et d'histoire *Tollie House* voudraient le conserver. Un donateur a déjà offert 50 000 livres, qu'il paiera à condition que les donations du public atteignent une somme équivalente.

➜ François Savatier

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Zoologie

Le coucou joue la montre

© Carl Antonio Balzan

Un coucou gris *(Cuculus canorus)*, l'espèce de coucou la plus répandue en Europe.

Le coucou pond ses œufs dans les nids d'autres espèces, telles des bergeronnettes, à charge pour les parents adoptifs de nourrir l'intrus. Le stratagème fonctionne d'autant mieux que l'indésirable naît un à deux jours plus tôt que n'éclosent les œufs du nid parasité, lesquels sont alors éjectés. Quels mécanismes expliquent cette naissance prématurée ? C'est ce qu'ont voulu savoir Tim Birkhead, de l'Université de Sheffield, en Grande-Bretagne, et son équipe.

Ils ont prélevé des œufs de coucou tout juste pondus et ont montré que les organismes qu'ils contenaient étaient à un stade de développement plus avancé que ceux d'autres œufs de même taille. Ils en ont déduit que les œufs de coucou sont préalablement incubés dans le ventre de leur mère, ce qui accélère leur croissance.

Ils ont vérifié leur hypothèse en incubant artificiellement, pendant 24 heures à 40 °C, les œufs d'une autre espèce, le diamant mandarin. Le développement des deux espèces est alors similaire. Ainsi, l'œuf de coucou « démarre » dans la vie avec une journée d'avance.

➜ Loïc Mangin

T. Birkhead et al., Proc. R. Soc. B., à paraître, 2010

Médecine

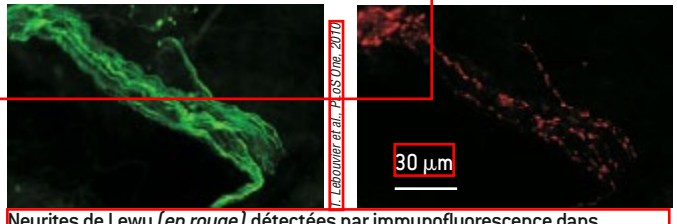
Détecter la maladie de Parkinson avant l'apparition des symptômes

La maladie de Parkinson détruit certains neurones du système nerveux central, entraînant un ralentissement des mouvements, une rigidité musculaire et des tremblements au repos. Elle touche aussi le système nerveux périphérique, ce qui déclenche d'autres types de symptômes : troubles du sommeil, perte de l'odorat, troubles du transit, etc.

En analysant des biopsies du côlon de patients atteints de la maladie, Thibaud Lebouvier, Michel Neunlist et leurs collègues de l'Unité INSERM 913, de l'Université et du CHU de Nantes ont montré que chez la majorité des malades, les lésions observées dans le système nerveux central sont également présentes dans les neurones de la muqueuse intestinale.

Dans les neurones touchés, une protéine, l'alpha-synucléine, s'accumule et forme des dépôts nommés corps ou neurites de Lewy (selon leur localisation dans ces neurones). En 2006, le neuroanatomiste allemand Heiko Braak a détecté, chez cinq patients parkinsoniens, tous décédés, mais pas nécessairement de la maladie de Parkinson, des corps de Lewy dans les neurones du côlon, pour certains à un stade précoce de la maladie. Étaient-ils dus à la maladie ? Pour le savoir, les biologistes nantais ont mis au point un protocole de biopsie du côlon chez les malades vivants, et d'analyse à l'aide d'un marqueur de l'alpha-synucléine. Ils ont ainsi confirmé le résultat de H. Braak : chez 21 des 29 patients parkinsoniens étudiés, des neurites de Lewy ont été détectées dans les neurones de la biopsie, alors qu'aucun des 10 patients sains testés ne présentait ces anomalies. En outre, la densité de neurites de Lewy reflète le degré d'avancement de la maladie.

Si ces résultats sont confirmés, les chercheurs nantais proposeront leur protocole pour évaluer la gravité de la maladie et distinguer la maladie de Parkinson d'autres maladies provoquant des symptômes similaires. Mais surtout, effectué avant même l'apparition des symptômes, ce diagnostic favoriserait la prise en charge précoce du patient.



T. Lebouvier et al., PLoS One, 2010

Neurites de Lewy *(en rouge)* détectées par immunofluorescence dans les neurones *(en vert)* du côlon d'un patient atteint de la maladie de Parkinson.

➜ Marie-Neige Cordonnier

T. Lebouvier et al., PLoS One, vol. 5, n° 9, e12728, septembre 2010

En bref

LE PARTENAIRE IDÉAL

Vous pensez avoir trouvé le (ou la) partenaire idéal(e) ? Ne lisez pas ce qui suit, vous seriez déçu. Des chercheurs montpelliérains ont montré, en interrogeant 96 couples hétérosexuels, que le physique, notamment la taille et le poids, du partenaire idéal ne correspond pas à celui de l'être aimé ! En général, les hommes rêvent de compagnes plus minces que la leur, et les femmes souhaitent un partenaire plus en chair... ou plus mince que leur compagnon !

LA FONTE DU MANTEAU

À 2 900 kilomètres de profondeur, à la frontière entre le noyau externe de fer liquide et le manteau terrestre, règne une pression de près de 1,4 million d'atmosphères et une température de plus de 4 000 °C. Des géophysiciens français de divers instituts de recherche ont reproduit ces conditions dans une petite cellule à enclume de diamant chauffée par un laser. Ils ont montré que, dans ces conditions, la structure cristalline la plus répandue dans le manteau, la pérovskite, fond partiellement. De quoi renforcer l'hypothèse d'un océan magmatique profond.

POMMES DE TERRE DOPÉES

Les tubercules, tels le manioc ou la pomme de terre, contiennent surtout des sucres, mais apportent très peu de protéines. Des chercheurs indiens ont créé une pomme de terre qui contient 60 pour cent de protéines supplémentaires et davantage d'acides aminés essentiels (les briques élémentaires des protéines). Ils l'ont cultivée depuis deux ans et l'ont testée chez l'animal : selon leurs résultats, leur pomme de terre est prête à être commercialisée et est sans danger pour l'homme.

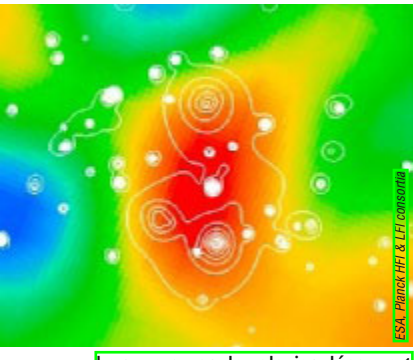
En bref

UN CERVEAU ANCESTRAL

Le plan à l'origine du cortex cérébral des mammifères est apparu chez un lointain ancêtre marin il y a 600 à 550 millions d'années. C'est ce que suggère la reconstitution en trois dimensions, par une équipe allemande, d'une combinaison unique de gènes s'exprimant dans des structures nerveuses des larves d'un ver annélide et dans le cortex cérébral de l'embryon de souris. Ces deux empreintes moléculaires sont trop similaires pour ne pas avoir la même origine.

CONNEXIONS FLUCTUANTES

Une équipe de l'Université Stanford a montré que le nombre de connexions entre neurones – les synapses – fluctue au cours du cycle jour-nuit. À l'aide d'une technique de microscopie, elle a étudié la répartition d'une protéine, la synaptophysine, dans certains neurones de larves de poisson zèbre. La quantité de cette protéine est liée au nombre de synapses créées. Or elle varie et culmine au début de la nuit. Ce résultat tend à confirmer que les bénéfices du sommeil résultent, entre autres, du remodelage des synapses.



Le superamas de galaxies découvert en ondes submillimétriques par le satellite *Planck* (en rouge, un excès d'émission dû à l'effet Sunyaev-Zel'dovich).

Géophysique

Les glaciers qui protègent les Andes de Patagonie

Les glaciers érodent les montagnes. Cette vérité géophysique ne l'est pas toujours… Autour de Stuart Thomson, de l'Université d'Arizona, une équipe de géologues américains vient de montrer que les glaciers du Sud de la Patagonie ont protégé les Andes de cette région.

Les chaînes de montagnes naissent dans les zones de subduction, là où une plaque continentale, en plongeant sous une autre, la comprime, la plisse et la surélève. Toutefois, l'érosion due notamment aux glaciers limite la hauteur des massifs. Les géologues pensent qu'à l'échelle du million d'années, un équilibre s'établit entre érosion et surélévation. Pour soutenir cette idée, ils ont montré que presque partout dans les Andes, la hauteur des montagnes est corrélée à la position de la ligne d'équilibre du glacier géant qui recouvrait cette chaîne de montagne durant le maximum de la dernière glaciation (il y a 20 000 ans). La ligne d'équilibre d'un glacier – là où les chutes de neige compensent la fonte des glaces – étant le lieu d'érosion maximale, cette constatation suggère que c'est avant tout l'érosion par les glaciers qui contrôle la hauteur des montagnes.

Pour autant, ce mécanisme n'est pas à l'œuvre en Patagonie du Sud, dont les montagnes gagnent en hauteur à mesure que l'on va vers le Sud, où existent des glaciers géants… Pour expliquer cette anomalie, S. Thomson et ses collègues ont prélevé des roches dans tous les reliefs andins, puis, par diverses méthodes, déterminé à quelle vitesse ces pierres se sont refroidies à mesure que l'érosion les rapprochait de la surface. Ils ont ainsi montré que plus on va vers le Sud de la Patagonie, plus les pierres de crête ont mis longtemps à affleurer. Ainsi, sous le climat de la Patagonie du Sud, il semble bien que les immenses glaciers protègent les pics des Andes au lieu d'en accélérer l'érosion.

Les monts Fitz Roy (3 375 mètres) et Cerro Torre (3 128 mètres) vus de la calotte de glace sud-patagonienne.

➜ F. S.

Nature, vol. 467, pp. 313-317, 2010

Astrophysique

Un superamas de galaxies dans le fond diffus

Le satellite *Planck* a été lancé en 2009 pour cartographier le fond diffus cosmologique, ce rayonnement de micro-ondes vestige de la première lumière émise, et dont les infimes fluctuations de température sont un paramètre clef des théories de formation de l'Univers. Mais en marge de cet objectif principal, l'observation de la totalité du ciel en micro-ondes apporte d'autres résultats. On vient ainsi de découvrir un superamas de galaxies grâce à « l'empreinte » qu'il a laissée sur le rayonnement de fond cosmologique.

Les amas et superamas de galaxies sont les plus grandes structures connues de l'Univers. En eux-mêmes, ils ne rayonnent pas en ondes millimétriques. Cependant, les photons du fond diffus sont altérés lorsqu'ils traversent ces amas. En particulier, l'interaction avec le gaz chaud modifie leur fréquence. Cet effet dit « Sunyaev-Zel'dovich » se manifeste par une région plus sombre que la moyenne aux fréquences inférieures à 217 gigahertz, et plus brillante aux fréquences supérieures, un signal caractéristique de la présence d'amas de galaxies.

Planck étant conçu pour scruter le ciel dans neuf bandes de fréquences millimétriques entre 30 et 857 gigahertz, il détecte aisément le contraste entre basses et hautes fréquences. Les premières observations complètes du ciel tout juste achevées ont ainsi permis de découvrir de nouveaux amas de galaxies, confirmées en rayons X. L'un d'eux est en fait un superamas constitué d'au moins trois amas de galaxies.

Planck apporte aussi un regard nouveau sur les amas de galaxies déjà connus en rayons X. De quoi mieux comprendre comment la matière noire et la matière visible s'organisent à l'échelle cosmique.

➜ Philippe Ribeau-Gésippe

http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=47692

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Éthologie

La ruse de l'oiseau jardinier

Le jardinier à nuque rose construit un berceau nuptial pour attirer les femelles à la saison des amours. John Endler, de l'Université Deakin en Australie, et ses collègues, ainsi que Natalie Doerr, de l'Université de Californie à Santa Barbara, ont montré que l'oiseau utilise une illusion d'optique pour paraître plus gros qu'il ne l'est. Le berceau, sorte de tunnel, est fait de brindilles entrelacées formant une arche à l'entrée. À son bout, le mâle aménage un pavage de pierres et de coquillages. L'oiseau dispose les gros objets au fond et les petits devant, près de l'entrée. Puis il se place au centre du tunnel pavé et attend qu'une femelle s'y engage.

La différence de taille des pierres crée une perspective artificielle, un procédé visuel employé par les artistes pour amplifier la profondeur de champ. Le mâle apparaîtrait à la femelle plus gros qu'il n'est en réalité, donc probablement plus séduisant. Les chercheurs ont inversé la disposition du pavage : l'oiseau s'en est rapidement aperçu et y a remis bon ordre en trois jours.

➜ Émilie Auvrouin

J. Endler et al., Current Biology, vol. 20, pp. 1-6, 2010

© Shutterstock/Janelle Lugge

Le mâle du jardinier à nuque rose dispose les pierres de son nid de telle façon à paraître plus grand qu'il ne l'est.

Neurobiologie

Opiorphine à double effet

En 2006, Catherine Rougeot et son équipe, de l'Institut Pasteur à Paris, découvrent dans la salive humaine une nouvelle molécule antalgique : l'opiorphine. Ils précisent aujourd'hui comment elle agit, et montrent que c'est aussi un antidépresseur.

On sait que les enképhalines contrôlent les voies de neurotransmission de la douleur et modulent l'activité de différentes structures cérébrales. Ce sont de petits peptides neuronaux sécrétés en réaction à certaines situations de stress – physique ou psychologique – pour limiter la propagation des signaux de douleur. Mais dans l'organisme, elles sont rapidement détruites par deux enzymes : la NEP et l'AP-N.

C. Rougeot et ses collègues ont montré que l'opiorphine inhibe ces deux enzymes ; elle prolonge donc l'action des enképhalines et est aussi efficace que la morphine. Mais elle n'en a pas les effets secondaires délétères (telle l'accoutumance). En outre, elle présente des effets antidépresseurs semblables à ceux de l'imipramine, utilisée en clinique pour traiter la dépression.

➜ Bénédicte Salthun-Lassalle

C. Rougeot et al., Journal of Physiology and Pharmacology, vol. 61, pp. 483-490, août 2010

Médecine

La bêta-thalassémie traitée par thérapie génique

Un homme atteint de bêta-thalassémie a été traité avec succès par thérapie génique. Cette maladie héréditaire fréquente est due à la mutation du gène codant la chaîne bêta de l'hémoglobine, la protéine qui transporte l'oxygène dans les globules rouges du sang. Elle se traduit par une forte anémie, une fatigue chronique et des déformations osseuses. Les malades doivent subir des transfusions régulières.

Cet essai de thérapie génique a été réalisé grâce à la collaboration de plusieurs équipes, dont celles de Philippe Leboulch, chef de l'Institut des maladies émergentes et des thérapies innovantes (iMETI, CEA, INSERM, Université Paris-Sud), à Fontenay-aux-Roses, et de Marina Cavazzana-Calvo et Salima Hacein-Bey-Abina, de l'Hôpital Necker-Enfants malades (INSERM, AP-HP), à Paris.

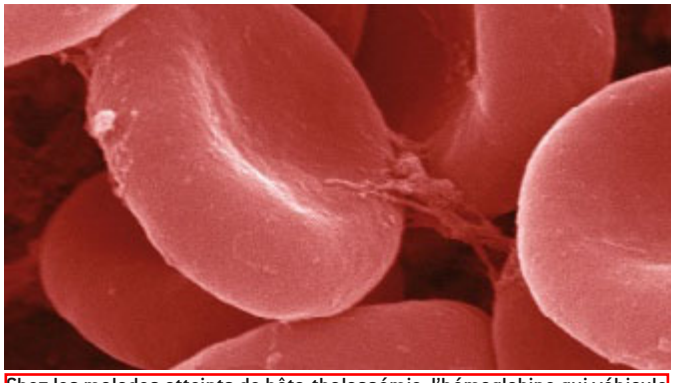
En 2007, des cellules de moelle osseuse ont été prélevées chez un malade âgé de 18 ans. Ces cellules souches (pouvant donner les lignées de cellules sanguines) ont été traitées par un vecteur viral (un lentivirus dérivé du VIH), dans lequel on avait inséré le gène codant une chaîne bêta fonctionnelle. Puis on a injecté au patient les cellules souches modifiées. Environ deux ans et demi plus tard, plus de dix pour cent des cellules souches de la moelle contenaient le gène correcteur, dont trois pour cent des érythroblastes, la lignée cellulaire donnant les globules rouges. La concentration globale d'hémoglobine atteignait neuf grammes par décilitre, la valeur que permettent d'obtenir les transfusions.

Toutefois, dans la moitié des cellules modifiées, le vecteur viral s'était inséré dans un gène, *HMGA2*, qui participe à la régulation de la prolifération et de la différenciation des cellules. Cette insertion a sans doute favorisé l'efficacité de la thérapie en augmentant la multiplication des érythroblastes.

Mais si cette insertion a un aspect positif, elle pourrait avoir un revers : dans plusieurs types de tumeurs cancéreuses, la protéine HMGA2 est en quantité anormalement élevée. La surproduction observée chez le patient traité risque-t-elle de provoquer une leucémie ? Le clone de cellules impliquées est resté stable depuis un an, ce qui est plutôt rassurant, d'après S. Hacein-Bey-Abina. L'essai clinique devrait se poursuivre chez trois autres malades en 2011, à l'Hôpital Necker, puis plus largement.

➜ Jean-Jacques Perrier

M. Cavazzana-Calvo et al., Nature, vol. 467, pp. 318-322, 2010



© CDC, Janice Carr

Chez les malades atteints de bêta-thalassémie, l'hémoglobine qui véhicule l'oxygène dans les globules rouges est anormale.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Immunologie

Des cellules pour tolérer le soi

Les maladies auto-immunes sont dues à une hyperactivité du système de défense de l'organisme, qui ne tolère plus le « soi » et détruit des cellules ou molécules de l'organisme. Chez les patients, des autoanticorps reconnaissent comme étrangers des antigènes du soi. Hye-Jung Kim, de la Faculté de médecine Harvard à Boston, et ses collègues ont découvert chez la souris des cellules immunitaires – des lymphocytes *T* régulateurs $CD8^+$ – qui contrecarrent ce dérèglement.

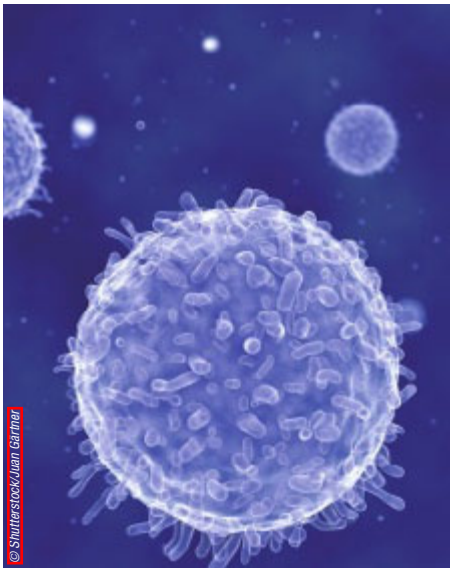
Pour défendre l'organisme, des cellules du sang, les lymphocytes *B* et *T*, reconnaissent les intrus et déclenchent des réactions immunitaires soit en produisant des anticorps dirigés contre les antigènes pathogènes, soit en détruisant l'intrus. Parfois, les lymphocytes *B* produisent des anticorps dirigés contre le soi. Ces auto-anticorps peuvent alors déclencher une réaction immunitaire inappropriée et une maladie auto-immune s'installe.

Comment agissent les lymphocytes *T* régulateurs $CD8^+$? En interagissant, *via* une protéine de surface nommée Qa-1, avec les lymphocytes *T* auxiliaires folliculaires – une variété de lymphocytes *T* qui déclenche la production d'anticorps ou d'autoanticorps par les lymphocytes *B* –, ils les inhibent. Les lymphocytes *T* auxiliaires folliculaires n'étant plus activés, ils ne stimulent plus les lymphocytes *B* : les autoanticorps ne sont plus produits.

H.-J. Kim et ses collègues ont ainsi montré que des souris qui n'expriment plus la protéine Qa-1 des lymphocytes *T* auxiliaires folliculaires développent une maladie auto-immune. Leur système immunitaire s'emballe et produit trop d'autoanticorps, car les lymphocytes *T* $CD8^+$ ne jouent plus leur rôle régulateur et ne peuvent plus limiter l'activation des lymphocytes *B*. Pourrait-on stimuler spécifiquement la production des lymphocytes *T* $CD8^+$?

→ B. S.-L.

Nature, vol. 467, pp. 328-333, 2010



© Shutterstock/Juan Gärtner

Les lymphocytes *T* régulateurs $CD8^+$ limitent la production des autoanticorps ; ils éviteraient les maladies auto-immunes.

149 MILLIARDS de nucléotides : le plus gros génome décrypté à ce jour, 50 fois plus grand que celui de l'homme, est celui d'une plante japonaise, *Paris japonica*.

Archéologie

Divinités gréco-romaines sur le lac de Tibériade

©Expedition Sussita/University of Haifa

Ci-dessus, la fresque de la déesse grecque de la fortune, Tyché, trouvée à Sussita. Sa tête est couronnée, et la jeunesse du regard soulignée. *Ci-contre*, cette figurine d'une Ménade, dans une position de danse dionysiaque, a été trouvée sur une assiette en os, dans le même ensemble où a été découverte la fresque de Tyché.

Sussita, sur la rive orientale de la mer de Galilée, ou lac de Tibériade, est une cité fondée au IIe siècle avant notre ère par les Séleucides, qui contrôlaient à l'époque la région. Elle a traversé les époques hellénistique, romaine, byzantine et celle des Omeyades, avant d'être détruite par un tremblement de terre en l'an 749. La 11e campagne de fouilles de Sussita, conduite par Arthur Segal et Michael Eisenberg, de l'Université de Haïfa, en Israël, a révélé des œuvres liées à la mythologie grecque et datant du IIIe ou IVe siècle de notre ère, c'est-à-dire à la fin de l'époque romaine ou au début de l'époque byzantine.

L'équipe de Mark Schuler, de l'Université Concordia aux États-Unis, explorait une résidence qui, par la qualité et la complexité de sa construction, semble avoir appartenu à l'un des notables de la ville. Dans une cour intérieure où une fontaine occupait le centre, les archéologues ont découvert une fresque de Tyché, la déesse grecque de la fortune, de la prospérité et de la destinée. Autre trouvaille : une remarquable petite sculpture d'une Ménade, ou Bacchante pour les Romains. Selon la mythologie grecque, les Ménades accompagnaient Dionysos, le dieu du vin, en dansant des danses frénétiques et en tenant un thyrse, long bâton surmonté d'une touffe de feuilles de vigne et qui symbolise la sexualité et la fécondité.

Ces découvertes témoignent d'éléments de culte gréco-romain, à une époque où le christianisme commençait à dominer et à supplanter les cultes pré-existants.

→ Maurice Mashaal

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

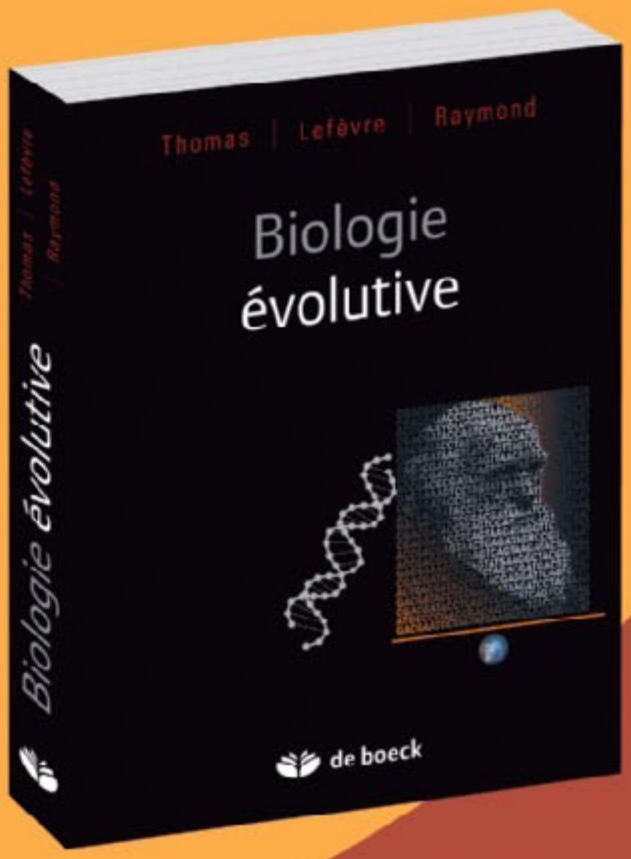
Biologie évolutive

Un livre évènement !

La communauté des évolutionnistes francophones, forte de sa richesse et sa diversité, a souhaité produire un ouvrage de référence destiné aux chercheurs et aux étudiants en Master et Doctorat.
Cette œuvre, unique en langue française, aborde tous les grands thèmes de la biologie évolutive :

- la génétique des populations et des métapopulations
- l'écologie comportementale
- les analyses phylogénétiques
- l'évolution des traits d'histoire de vie
- l'évolution moléculaire
- la biologie évolutive humaine
- les interactions entre espèces
- l'évolution du sexe
- l'évolution expérimentale, etc.…

En savoir plus sur :
https://sites.google.com/site/biologieevolutive/



« Un ouvrage majeur dans un domaine qui reste, 150 ans après Darwin, à la pointe de la recherche. »

Sous la direction de :
Frédéric Thomas,
Thierry Lefèvre,
Michel Raymond

840 p. - Parution août 2010 - 89.00 €

de boeck En librairie et sur www.deboeck.com

Prix Nobel de médecine

Les bébés-éprouvettes

Le Britannique Robert Edwards, de l'Université de Cambridge, est récompensé pour avoir mis au point la technique de fécondation *in vitro*, ou FIV.

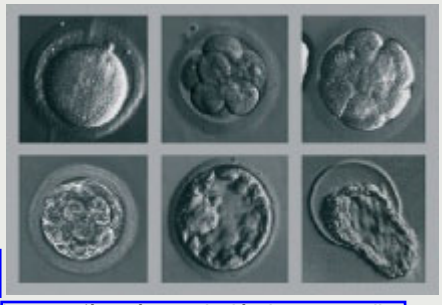
La FIV fut d'abord étudiée pour des animaux non mammaliens, le plus souvent aquatiques, chez qui le processus est externe, et se déroule dans l'eau. L'application aux humains présentait plusieurs défis : il fallait contrôler la maturation de l'ovocyte (la cellule qui fusionne avec le spermatozoïde), le prélèvement des ovocytes, l'activation des spermatozoïdes, le transfert de l'embryon dans l'utérus...

Dans les années 1950, R. Edwards, à Londres, s'intéresse à la meilleure façon de prélever des ovocytes matures. Il opte d'abord pour un prélèvement d'ovocytes précoces et étudie les conditions les plus favorables à une maturation *in vitro*. Il montre que 24 heures d'incubation sont nécessaires au déclenchement du processus qui conduit au stade ultime. Restait à mettre en scène la fécondation elle-même.

S'inspirant de travaux sur le hamster, R. Edwards montre en 1969 que des spermatozoïdes peuvent fusionner avec des ovocytes matures, mais n'obtient qu'un embryon à deux cellules. Selon R. Edwards, ces échecs étaient imputables au temps, trop long, que passait l'ovocyte hors du corps. Il propose alors de prélever des ovocytes dont la maturation, contrôlée par un traitement hormonal, s'est déroulée *in vivo*.

L'étape suivante, le prélèvement d'ovocytes en nombre suffisant au stade de développement souhaité, est franchie avec l'aide du chirurgien et obstétricien Patrick Steptoe (décédé en 1988). En 1970, ils parviennent à un embryon de huit cellules. Puis une modification du traitement hormonal prescrit aux femmes (pour obtenir les ovocytes matures) empêche le rejet par l'utérus de l'embryon réimplanté. Une première grossesse est obtenue en 1976, mais des complications obligent à l'interrompre. Les tentatives suivantes sont plus heureuses et, le 25 juillet 1978, naît Louise Brown, le premier « bébé-éprouvette ».

En France, la première FIV, menée par le biologiste Jacques Testart et le gynécologue René Frydman, conduira à la naissance d'Amandine le 24 février 1982 à l'Hôpital Antoine Béclère, à Clamart. Dans le monde, près de dix pour cent des couples seraient stériles. La FIV est une solution pour beaucoup et l'on estime qu'à ce jour, environ quatre millions d'individus ont été conçus ainsi.



Vrockey

Les premières étapes du développement d'un embryon humain *in vitro*.

➜ L. M.

René Frydman, Les limites de la procréation médicalement assistée, Pour la Science n° 345, juillet 2006

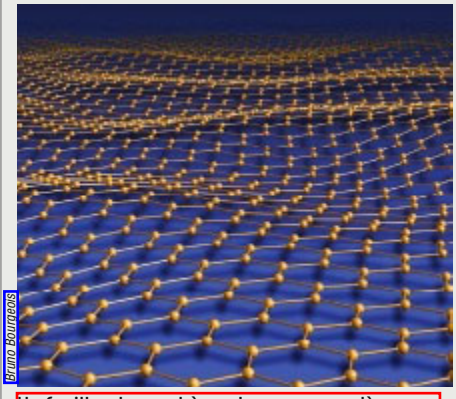
Prix Nobel de physique

Le graphène

Le Néerlandais d'origine russe Andre Geim et le Russo-Britannique Konstantin Novoselov se partagent le prix Nobel pour leurs travaux sur le graphène, feuillet de graphite d'épaisseur monoatomique.

Le graphène, nouvelle forme du carbone, constitue le premier cristal bidimensionnel connu. C'est ce matériau exceptionnel à plus d'un titre que l'équipe de A. Geim et K. Novoselov, à l'Université de Manchester (Grande-Bretagne), a réussi à obtenir en 2004. Ils l'ont fait par exfoliation mécanique : avec un simple ruban adhésif, ils ont pelé des feuillets de carbone à partir de graphite, feuillets qu'ils ont ensuite déposés sur une surface de dioxyde de silicium. Certains des feuillets ainsi obtenus, formés par des atomes de carbone chimiquement liés entre eux de façon à former des hexagones (chaque atome étant lié à trois autres), sont d'épaisseur monoatomique et qualifiés de graphène.

Le graphène s'est vite révélé un matériau très intéressant, et de nombreuses équipes de physiciens se sont mises à explorer ce nouveau domaine. Tout d'abord, le graphène a surpris parce qu'on pensait, en vertu d'un théorème datant de la fin des années 1960, qu'un cristal bidimensionnel ne pouvait être stable, en raison de l'agitation thermique. Mais le graphène échappe au théorème car, s'il est bidimensionnel, il réside dans un espace à trois dimensions : il peut se déformer dans la troisième dimension, ce qui rend l'agitation thermique moins néfaste à la stabilité de la structure.



Bruno Bourgeois

Un feuillet de graphène n'est pas complètement plan, en raison des fluctuations thermiques.

Ensuite, le graphène a des propriétés électroniques extraordinaires. C'est notamment un très bon conducteur électrique (à température ambiante, il conduit l'électricité plus vite que tout autre matériau), qui devrait trouver des applications en micro- et nanoélectronique, par exemple pour réaliser des transistors bien plus rapides que les transistors actuels, à base de silicium. Le graphène est également captivant sur le plan théorique : on peut le modéliser par l'électrodynamique quantique à deux dimensions, théorie explorée par les physiciens dans les années 1950 à 1970 afin de mieux comprendre la théorie quantique des champs en trois dimensions d'espace.

En outre, le graphène est un matériau presque complètement transparent, excellent conducteur de la chaleur, et doté d'une grande rigidité. Toutes ces propriétés, dont l'origine relève souvent de la physique quantique, font du graphène un matériau fascinant pour les physiciens et prometteur pour ses usages.

➜ M. M.

J.-N. Fuchs et M. O. Goerbig, Le graphène, premier cristal bidimensionnel, Pour la Science n° 367, mai 2008

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Prix Nobel de chimie

La catalyse au palladium

Les molécules organiques, formées d'un squelette carboné, sont omniprésentes : dans l'alimentation, les médicaments, les plastiques, etc. Les liaisons simples carbone-carbone sont très résistantes, mais aussi difficiles à former, de sorte que la synthèse de molécules organiques complexes pose un défi aux chimistes. Le comité Nobel a récompensé l'Américain Richard Heck et les Japonais Ei-ichi Negishi et Akira Suzuki pour avoir mis au point des réactions catalysées par le palladium, dites de couplage, permettant de former plus facilement ces liaisons. Grâce à cette méthode, de nombreuses molécules organiques complexes ont été synthétisées. L'industrie pharmaceutique et l'industrie électronique, à la recherche de méthodes de synthèse efficaces, ont bénéficié de ces innovations.

Le palladium est un métal capable de catalyser, c'est-à-dire d'accélérer, la formation de liaisons entre atomes de carbone. Les réactions de couplage catalysées par le palladium de R. Heck, E. Negishi et A. Suzuki reposent toutes sur un même principe. Des atomes de carbone se lient au palladium par le biais de liaisons métal-carbone (en partie ioniques, en partie covalentes). Cela modifie la conformation des molécules et rapproche deux atomes de carbone, qui peuvent alors réagir et se lier par une liaison covalente. Dès que cette liaison est créée, le catalyseur au palladium est libéré, prêt à servir dans une nouvelle réaction de couplage.

Du palladium à l'état solide.

© Tomihahndorf

Trois points ont fait la force de ces réactions : les conditions de température (on ne dépasse généralement pas 110 °C), les rendements (ces réactions sont quasi totales) et leur compatibilité avec une grande variété de groupes fonctionnels. Elles ont permis de remplacer les catalyseurs au cuivre par des catalyseurs au palladium. La réaction de couplage catalysée par le cuivre permet aussi de former des liaisons simples carbone-carbone, mais dans des conditions plus drastiques (jusqu'à 200 °C). En outre, le palladium est un métal relativement courant et moins onéreux que d'autres catalyseurs utilisés dans l'industrie.

Un exemple de molécule synthétisée (en 1994) grâce à la réaction de couplage de Suzuki est la palytoxine, isolée en 1971 du poison d'un corail hawaïen. Formée d'un squelette de 129 atomes de carbone, cette molécule a une structure complexe. En s'accumulant dans les tissus des poissons et des fruits de mer, elle provoque des intoxications chez ceux qui les consomment. Sa synthèse en quantités suffisantes a permis de mieux comprendre son mode d'action.

Citons aussi le cas de la discodermolide, isolée en 1990 d'une éponge de la mer des Caraïbes. Des chimistes ont synthétisé la molécule en utilisant, dans les dernières étapes, la réaction de Negishi. Ils s'intéressent à cette molécule, car c'est un anticancéreux qui bloque la division des cellules cancéreuses. Elle est actuellement en cours d'essai clinique.

Un autre exemple d'application : dans l'industrie électronique, les chimistes ont utilisé des réactions de Heck, Suzuki et Negishi pour optimiser l'émission de lumière bleue dans les OLED, les diodes électroluminescentes organiques présentes dans les téléviseurs à écran plat de nouvelle génération.

→ E. A.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2010/sci.html

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

L'extinction d'espèce

histoire d'un concept & enjeux éthiques

Julien Delord

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

C'est en réponse à ces questionnements essentiels où s'entrecroisent les perspectives millénaires de l'histoire environnementale des civilisations humaines et l'urgence de la crise de la biodiversité contemporaine que ce livre suggère nombre d'éclaircissements historiques et philosophiques à même de nourrir une indispensable réflexion écologique.

ISBN : 978-2-85653-656-8 • 692 p. • 45 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsci

Paléontologie

Dinosaures charentais

En janvier 2010, des paléontologues français découvraient un gisement paléontologique dans les carrières Audoin, à Angeac-Charente, près d'Angoulême. Le site est constitué de strates argileuses du Crétacé inférieur (il y a 130 millions d'années). Cet été, pendant 20 jours, les paléontologues l'ont exploré. Il se révèle comme l'un des plus importants sites à dinosaures de France.

Les archéologues y ont déjà découvert plus de 400 ossements, très bien conservés grâce à leur enfouissement rapide dans les dépôts argileux de la région au cours du Crétacé. Ces pièces proviendraient de restes de tortues, de crocodiles et de trois espèces de dinosaures. Il y a notamment un fémur de plus de 2,20 mètres qui proviendrait d'un sauropode herbivore pesant une quarantaine de tonnes. S'y trouvent aussi des ossements et une dent de petits dinosaures herbivores, et des os d'un grand dinosaure carnivore, probablement de la famille des théropodes.

➜ B. S.-L.

Physiologie

Urines à l'odeur d'asperge

Régalez-vous d'asperges et allez aux toilettes quelques minutes après : vous sentez une odeur sulfureuse désagréable. C'est tout à fait normal. Seules quelques personnes ne la perçoivent pas. Est-ce parce qu'elles ne la produisent pas ou parce qu'elles ne la sentent pas ? Des biologistes aux États-Unis ont répondu à cette question : les deux cas existent.

Marcia Levin Pelchat et ses collègues ont testé les urines de 38 volontaires avant et après qu'ils ont mangé des asperges ou du pain, et ils leur ont fait identifier l'odeur sulfureuse et une odeur de rose. Ils ont aussi analysé les gènes de leurs récepteurs olfactifs. Résultats : environ huit pour cent des personnes ne produisent pas l'odeur d'asperges dans leurs urines, et six pour cent ne la sentent pas (bien qu'elles sentent l'odeur de rose). Seul un sujet ne la produisait pas et ne la sentait pas. Ces différences d'olfaction pour les composés sulfureux correspondent à des différences génétiques des récepteurs exprimés dans le nez. En outre, cela prouve que les humains n'ont pas tous le même métabolisme de dégradation de l'asperge.

➜ B. S.-L.

M. Levin Pelchat et al., Chemical Senses, en ligne, 27 septembre 2010

Astrophysique

Simuler les flambées d'étoiles

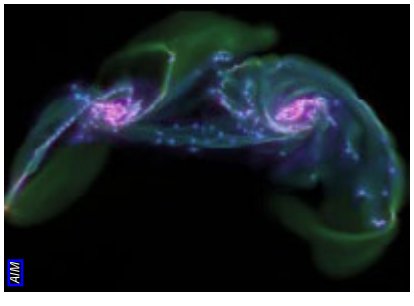
La collision entre deux galaxies entraîne la formation de nouvelles étoiles un peu partout dans leurs disques. Mais les simulations numériques peinent à reproduire cette situation : la flambée d'étoiles n'y a lieu que dans le centre galactique. Romain Teyssier et ses collègues du Laboratoire Astrophysique, instrumentation et modélisation, à Paris, viennent de réaliser une simulation numérique à haute résolution plus réaliste. Elle montre que lors d'une collision, de nouvelles étoiles se forment dans tout le disque.

La puissance de calcul limitée interdit de prendre en compte simultanément toutes les échelles en jeu dans les simulations numériques, de la galaxie entière à l'étoile en formation. De fait, la résolution maximale était jusqu'ici de l'ordre de 100 années-lumière. Le gaz interstellaire était donc considéré comme un milieu homogène, et les nuages moléculaires froids, structures plus denses où naissent les étoiles, d'une taille inférieure à une centaine d'années-lumière, n'étaient pas résolus. Dans ces modèles, suite à la collision, le gaz interstellaire « coule » vers le centre de la galaxie. Il s'y forme un noyau dense et massif, où naissent les nouvelles étoiles. Cette concentration ne reproduit pas les flambées réelles de formation stellaire.

R. Teyssier et ses collègues ont réussi à simuler une collision de galaxies avec une résolution de 26 années-lumière, assez pour suivre la formation des nuages moléculaires géants. Ils ont alors constaté qu'une partie du gaz s'effondre en une myriade de nuages moléculaires dispersés dans tout le disque avant d'avoir pu tomber au centre de la galaxie. Dans chacun, une flambée d'étoiles se produit. Cette formation stellaire étendue et non homogène reproduit bien mieux que les modèles précédents les observations, par exemple du système des Antennes.

➜ Ph. R.-G.

The Astrophysical J. Lett., vol. 720(2), pp. L149-L154, 2010



Simulation de la collision des galaxies des Antennes telle qu'elle se présentait il y a 150 millions d'années. Le gaz est représenté en vert, les vieilles étoiles en rouge et les jeunes étoiles en bleu.

DERNIÈRE minute ...

PASSAGE DE VIBRATIONS DANS LE VIDE
Une équipe allemande, à Oldenburg, a montré que quand on place une molécule de monoxyde de carbone (CO) au bout d'une aiguille en platine-iridium chaude, et qu'on l'approche à 0,3 millimètre d'un plan d'or froid, les phonons (quanta de vibration du réseau cristallin) créés par l'agitation thermique de la pointe se transmettent, *via* des champs électriques, dans l'or et le chauffent 10^{10} fois plus vite que ne le fait le rayonnement infrarouge de la pointe !

DÉMASQUER LA COCAÏNE
Détecter en quelques minutes de la cocaïne dissoute dans des bouteilles d'alcool sera bientôt possible sans les ouvrir, grâce à deux techniques. La première, mise au point en Angleterre, utilise la spectroscopie Raman ; portative, elle détecte 60 grammes par litre. La seconde, élaborée en Suisse, est fondée sur la spectroscopie RMN ; elle détecte jusqu'à 1,5 gramme par litre, mais elle n'est pas transportable…

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

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

ASSURANCE VIE ET CRISE FINANCIERE

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.

SERCC 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 1er 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'Epargne ont, en 2010, décerné pour la troisième année consécutive le label d'excellence à Altinéo.

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

Didier Ledeur, Directeur Général de la GMF VIE

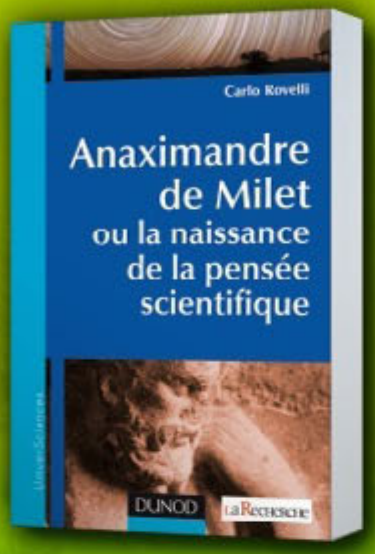
« Une expertise qui profite directement aux épargnants »

« 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. »

(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 annualisé 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.

GMF
Assurément Humain

SCIENCE ET CONSCIENCE



C. ROVELLI

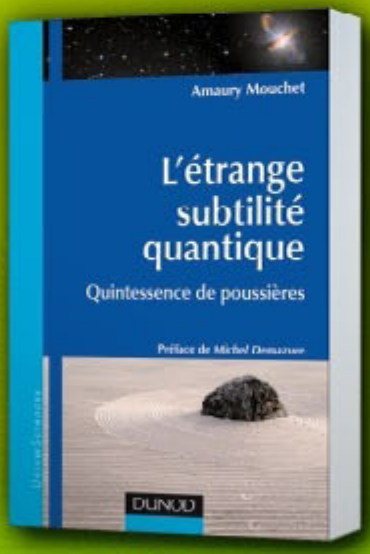
9782100529391 ▪ 196 pages ▪ **19,50 €**

Le grand physicien, Carlo Rovelli, explore l'origine des sciences

A. BARRAU, D. PARROCHIA

9782100547838 ▪ 416 pages ▪ **29 €**

Une enquête sur les grandes questions posées par la cosmologie



A. MOUCHET

9782100546596 ▪ 144 pages ▪ **15 €**

Une explication simple des lois de la physique quantique

F. VANNUCCI

9782100547890 ▪ 224 pages ▪ **18 €**

L'histoire de la physique des particules pour comprendre la matière

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

Pour recevoir gratuitement notre catalogue : crea@dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

COUP DE CHAUD SUR LE RIZ

Le riz est la céréale la plus consommée au monde : elle nourrit plus de la moitié de l'humanité. Pour suivre la croissance démographique, la production mondiale de riz devra augmenter d'un quart d'ici 2025, alors qu'elle a déjà été multipliée par trois depuis 40 ans. Pour ce faire, les agronomes créent des variétés de riz qui tolèrent la sécheresse et d'autres contraintes, en croisant des plants et en sélectionnant les caractères intéressants (voir *Le riz, vers des variétés mieux adaptées*, *Pour la Science*, mars 2010, http://bit.ly/plsoer389). Un autre facteur environnemental est à prendre en compte : l'augmentation des températures diurnes et nocturnes. Des chercheurs américains viennent de montrer que si les températures continuent d'augmenter dans les régions tropicales et subtropicales d'Asie, la production de riz ralentira (*PNAS*, 9 août 2010). Ils ont analysé six ans de données concernant 227 cultures irriguées de riz dans les six principales régions productrices de riz en Asie (qui fournissent 90 pour cent de la production mondiale) : l'augmentation des températures depuis 25 ans a déjà ralenti la production de 10 à 20 pour cent. Il faudrait adapter les méthodes de production ou trouver des variétés supportant les températures élevées.

UN NERF QUI REPOUSSE

Si la salamandre est capable de régénérer à l'infini une patte, ce n'est pas le cas de la plupart des vertébrés adultes. En revanche, pendant le développement embryonnaire, même les mammifères peuvent remplacer des bourgeons de membres perdus. Mais cette aptitude disparaît avant la naissance (voir *Un bras qui repousse ?*, *Pour la Science*, septembre 2008, http://bit.ly/plsoer371). Le remplacement d'un membre suppose la repousse de la peau, des os, des muscles, des ligaments, des tendons, des vaisseaux sanguins et des nerfs. La régénération des nerfs intéresse notamment les victimes de lésions à la moelle épinière où se trouvent les fibres nerveuses qui contrôlent les mouvements volontaires, car aujourd'hui, la paralysie est incurable. Des chercheurs américains viennent de régénérer ces fibres dites corticospinales chez des souris (*Nature Neuroscience*, 8 août 2010). Ils ont montré que la capacité de régénération des neurones corticospinaux dépend d'un couple de molécules enzymatiques nommé PTEN/mTOR. Après le développement, l'activité de mTOR – qui participe à la prolifération cellulaire – dans les neurones est diminuée ; en effet, PTEN bloque l'expression de cette enzyme. En réactivant cette voie moléculaire chez des souris adultes ayant une lésion de la moelle épinière – c'est-à-dire en supprimant le gène *Pten* codant PTEN –, les chercheurs ont constaté que les neurones se reconstruisent et forment des connexions. Reste à voir si les souris marchent à nouveau…

UN NOUVEL ANTIBIOTIQUE ?

Les antibiotiques tuent les bactéries qui leur sont sensibles, mais favorisent le développement des autres, plus ou moins insensibles. L'antibiotique finit ainsi par ne plus faire effet (voir *Consommation d'antibiotiques et résistance des bactéries*, *Pour la Science*, mai 2005, http://bit.ly/plsoer331). Si l'on ne veut pas se trouver démuni face aux infections bactériennes, on doit changer la façon de consommer ces médicaments et en trouver de nouveaux. Les quinolones sont des antibiotiques qui inhibent une enzyme, la topoisomérase IIA, des bactéries et notamment du staphylocoque doré. Cette enzyme modifie l'enroulement de l'ADN dans la bactérie, un mécanisme nécessaire à sa multiplication. Or les bactéries deviennent résistantes à ces antibiotiques. Plusieurs chercheurs ont mis au point d'autres inhibiteurs de la topoisomérase IIA. En observant aux rayons X la structure de l'enzyme en présence d'un nouvel inhibiteur, nommée GSK 299423, des cristallographes américains ont découvert comment fonctionnait leur molécule (*Nature*, 5 août 2010) : elle forme un pont entre l'ADN bactérien et une région de l'enzyme où les quinolones n'agissent pas. Et cette molécule inhibe la réplication des bactéries, qu'elles soient Gram-positives, tel le staphylocoque doré, ou Gram-négatives, comme *Escherichia coli*. Les molécules de la famille de GSK 299423, si elles sont sans danger pour l'homme, représentent de bons candidats pour combattre les bactéries.

Ben Bax

La topoisomérase IIA est une enzyme des bactéries qui permet la réplication de leur ADN *(en vert)*. Elle participe donc à leur multiplication. La nouvelle molécule GSK 229423 *(en jaune)* se fixe sur l'enzyme et bloque son action.

SURPRENANT GRAPHÈNE !

Le graphène est une feuille d'atomes de carbone à deux dimensions qui présente d'étonnantes propriétés physiques (voir *Le graphène, premier cristal bidimensionnel*, *Pour la Science*, mai 2008, http://bit.ly/plsoer367). Une nouvelle s'y ajoute : en faisant croître du graphène sur un substrat en platine, des chercheurs américains ont montré qu'il forme des nanobulles dont les électrons se comportent comme s'ils étaient soumis à un champ magnétique gigantesque de plus de 300 teslas ! L'étirement des nanobulles change la longueur des liaisons entre les atomes de carbone, ce qui modifie les déplacements des électrons les uns par rapport aux autres.

➜ Bénédicte Salthun-Lassalle

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

POINT DE VUE

Pour une approche moins restrictive de la biodiversité

Aujourd'hui, on tend à ne voir les organismes vivants qu'à l'aune de leur rôle écologique ou de leur utilité. Une vision partielle et partiale qui brouille les enjeux de la biodiversité.

Guillaume LECOINTRE

L'année 2010 célèbre la biodiversité. C'est sans doute une bonne chose. Mais les discours médiatiques et politiques, les livres (pourtant écrits par des biologistes), ne voient cette biodiversité qu'à travers ce que les espèces *font*. Hormis les inventaires et dénombrements des espèces, il n'est question que des relations dynamiques entre les espèces d'aujourd'hui (leur fonction dans les milieux, leur écologie), de la modélisation et prédiction de ces relations.

Rien de plus normal : il existe une demande politique forte pour des indicateurs prédictifs permettant des prises de décision en matière de conservation. Toutefois, la biologie et les politiques de la conservation sont en train de devenir borgnes. Car on peut voir une espèce ou des espèces non pas en fonction des « services » qu'elles rendent (ce qu'elles *font*), mais en fonction de l'originalité de leur patrimoine anatomique ou génétique (ce qu'elles *ont*). Or ce dernier aspect tend à être négligé.

Détaillons. Depuis les origines des sciences naturelles, une tension existe dans notre appréhension du vivant, entre ce que les êtres vivants *font* et ce qu'ils *ont*. Ce qu'ils font ne reflète pas nécessairement ce qu'ils ont, et inversement. Une mouche vole avec un organe qui n'a rien à voir avec le membre antérieur d'une chauve-souris (même fonction, structures différentes) ; un moineau vole avec un organe qui ressemble fort à celui du corbeau (même fonction, même structure) ; une chauve-souris vole avec un organe qui ressemble beaucoup à celui avec lequel un hérisson marche (fonctions différentes, même structure).

Toutes les combinaisons sont possibles, avec tous les pièges qui peuvent être tendus à notre soif de mise en ordre. Ainsi, le thylacine, animal de Tasmanie, « fait » le loup (mêmes aspect et mœurs), alors qu'à l'intérieur, c'est du kangourou. Le dauphin « fait » le « poisson », alors qu'à l'intérieur c'est du mammifère. L'ordre écologique ne suit pas nécessairement l'ordre dans la disposition des organes.

LA SYSTÉMATIQUE,
science qui classe les êtres vivants d'après ce qu'ils ont et non ce qu'ils font, est une discipline occultée

Ces problèmes tiennent pour une large part à des questions de vocabulaire. En effet, à y regarder de près, aucun organisme vivant n'a exactement la même chose ni ne fait exactement la même chose que son voisin, fût-il de la même espèce : la variabilité est omniprésente dans le vivant. Pour parler de la nature, nous avons besoin d'y projeter des concepts, lesquels doivent remplir certains critères qu'on leur a fixés, et de leur appliquer des conventions de langage.

Ainsi, dehors, il n'y a pas d'oiseaux : il n'y a que des individus. « Oiseaux » est un concept forgé par l'homme et défini par ce que ces individus *ont* : des plumes et un bec (entre autres caractéristiques). Ces concepts et conventions régissent le degré de similitude ou de différence à partir duquel on utilisera le même mot pour désigner des structures ou des fonctions qui diffèrent toujours dans le détail. La science qui régit ces relations entre des objets naturels, des concepts et des noms est la *systématique*, science des classifications.

La systématique régit ce que les êtres vivants *sont*. Par convention, aujourd'hui, elle fonde ses concepts classificatoires sur ce que les êtres vivants *ont* (ainsi, les « oiseaux » ont tous des plumes). Mais d'autres disciplines, comme l'écologie, forgent aussi leurs concepts sur ce que les êtres vivants *font* (par exemple, les « algues » font toutes de la photosynthèse en milieu aquatique), ou bien sur les deux attributs (ainsi, les « poissons » ont des vertèbres mais nagent dans l'eau).

Selon l'un ou l'autre, on voit se formuler des phrases contradictoires. Si l'on s'intéresse aux relations dynamiques entre dinosaures de la fin du Jurassique, leurs tailles, leurs habitudes, leurs relations et rôles écologiques dans les milieux de l'époque, il est certain que les dinosaures ont disparu. Si l'on s'intéresse à ce qu'ils *ont*, on doit envisager la définition des *Dinosauria* qui tient, entre autres caractères, à la présence d'un trou particulier dans le bassin de ces organismes.

Ces structures n'ont pas disparu de la nature actuelle, elles persistent chez les oiseaux. Rien d'étonnant à cela : les oiseaux sont les descendants des dinosaures. Pour parler plus rigoureusement le langage de la systématique, les oiseaux *sont* des dinosaures, puisqu'ils en portent la marque ana-

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

tomique. Pour un systématicien, les dinosaures n'ont donc pas disparu.

Ces considérations ne sont pas anodines et ont des conséquences sur les politiques de conservation. Par exemple, personne n'ira plaider une campagne coûteuse de sauvegarde du cœlacanthe : vu le nombre d'individus, vu l'habitat (les grottes profondes des pentes des îles volcaniques de l'océan Indien), sa disparition ne va pas révolutionner le milieu terrestre ou océanique. L'impact du cœlacanthe en termes de « service » est ridicule.

Mais il est le seul vertébré actuel à présenter une articulation intracrânienne, une queue à trois lobes, etc. En fait, le cœlacanthe est truffé de caractères rares. Il est donc très précieux en termes de patrimoine anatomique. Il en est de même de l'ornithorynque et de bien d'autres espèces, que les prismes écologique et utilitariste tendent à oublier.

De même, on oublie la systématique, science fondamentale que l'on ne répertorie même pas parmi les disciplines qui catégorisent les articles de vulgarisation parlant de flore ou de faune : on préfère « écologie », « biodiversité » ou « évolution ».

Ce point aveugle, au premier chef chez les biologistes, a des conséquences politiques considérables lorsqu'il s'agit d'allouer des moyens financiers, matériels et humains. La science qui consiste à savoir sur quels organismes on travaille, sur laquelle toutes les autres disciplines biologiques sont assises, se retrouve dépouillée – le plus souvent inconsciemment – par ceux-là même qui en ont le plus besoin. La systématique est bien trop rarement identifiée en tant que telle dans les organismes et les programmes de recherche. Il en est de même des nombreux rapports officiels sur la biodiversité (même ceux de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité !). Ainsi, les « Libres points de vue d'académiciens sur la biodiversité » publiés le 22 juillet 2010 ne la citent que deux fois en 108 pages, et encore pour parler d'autre chose. Généralement, cette science se retrouve diluée dans des thématiques globales telles que l'écologie ou l'agronomie, comme s'il fallait aux systématiciens un alibi pour mener leurs recherches.

La communauté des biologistes tend à occulter la systématique, et cela s'appelle scier la branche sur laquelle on est assis.

Guillaume LECOINTRE est directeur du Département **Systématique et évolution** *du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.*

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

ÉCONOMIE

Perversités bancaires

La frilosité des investisseurs est favorisée par de faibles taux d'intérêt qui seraient, en principe, favorables aux industries.

Ivar EKELAND

Quand j'étais jeune étudiant et que je cherchais ma voie, j'avais lu la *Théorie générale* de Keynes, et j'en avais conclu qu'il valait mieux que je continue à faire des mathématiques. Quarante-cinq ans après, je la relis, et je comprends les raisons de mon incompréhension. Dès la première phrase de l'ouvrage, Keynes dit : « Ce livre s'adresse d'abord à mes collègues économistes », et c'est strictement vrai. On ne peut pas comprendre de quoi il parle si l'on ne maîtrise pas les concepts de l'économie classique.

Un jeune mathématicien de 20 ans ne pouvait guère savoir tout cela, mais même le vieil économiste que je suis devenu apprend beaucoup de choses en lisant Keynes. J'ai l'impression d'avoir enfin compris ce qu'est la monnaie. Dans la théorie classique, c'est un moyen de paiement. Elle est, soit absente (on désigne un des biens comme numéraire, et on exprime tous les prix en unités de ce bien), soit introduite de façon artificielle. Ce sont les modèles dits « cash-in-advance » : on ne peut pas acheter à crédit, il faut mettre l'argent sur la table.

Pour Keynes, la monnaie, c'est avant tout la liquidité, c'est-à-dire un moyen pour son détenteur de se retirer momentanément du jeu économique, tout en gardant la faculté de le réintégrer à tout moment. C'est bien ce qui se passe en ce moment. Les investisseurs, ne sachant si la récession est derrière nous, ou si au contraire elle va s'accentuer, gardent une partie de leurs actifs par-devers eux sous forme de cash, ou d'argent placé au jour le jour, pour pouvoir réagir rapidement quand l'ambiguïté sera levée.

En économie classique, garder son argent sous son matelas n'a guère de sens : quelle

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

que soit mon aversion au risque, le marché me fournira toujours un placement suffisamment sûr, ou suffisamment alléchant pour que j'accepte de diminuer mon compte-courant. Et si j'ai besoin de mon argent entretemps, il me suffira de revendre mon placement à un tiers. Mais, dans la réalité, ce n'est pas ainsi que les choses fonctionnent. Dans des temps incertains, comme ceux que nous vivons, particuliers et banques veulent disposer de leur argent à tout moment, de sorte que les entreprises qui voudraient investir dans des projets industriels ou commerciaux ne trouvent plus à se financer. Pour y remédier, les gouvernements peuvent intervenir de deux façons. Ils peuvent financer eux-mêmes la production, par exemple en se lançant dans un programme de travaux publics. Mais ils peuvent aussi fournir de la liquidité aux banques, en leur permettant d'emprunter à la banque centrale à des taux avantageux, dans l'espoir que les banques prêteront aux entreprises cet argent, qui n'est ni le leur ni celui de leurs clients.

Bien entendu, les néolibéraux, hostiles à toute intervention de l'État, préfèrent, et de loin, la seconde solution. Rien de neuf à cela : déjà du temps de Keynes, c'était la position de von Hayek. Mais Keynes fit observer que, quand les taux sont déjà très bas, comme en ce moment, cela ne fait qu'aggraver le problème. En effet, si les banques peuvent se procurer de l'argent à 1 % auprès de la banque centrale, un particulier ne trouvera guère de rendement plus élevé. Le gain est dérisoire, et de surplus extrêmement sensible aux variations du taux d'intérêt. Supposons que je place mon argent à 1 % : j'achète une obligation qui me rapporte 10 000 euros si je la vends dans un an. Je la paie 9 900 euros, soit une rémunération de 100 euros. Mais si le taux augmente de 1 % et passe à 2 %, ce qui n'est pas grand-chose, le lendemain, la même obligation vaudra 9 800 euros, et la rémunération 200 euros. Examinant ces perspectives, je serais bien sot de me séparer de mon argent maintenant : mieux vaut attendre que les taux remontent.

Et, pour vérifier tout cela, une expérience grandeur nature. L'Union européenne a pris la deuxième voie, et les banques ont emprunté à la BCE pour plusieurs centaines de milliards. Où est cet argent maintenant ? Dans les entreprises, qui en ont besoin pour investir ? Vous n'y êtes pas. Chez les particuliers, pour relancer la consommation ? Encore moins. Il est retourné à la BCE, où il est placé au jour le jour : au plus fort de la crise, les dépôts bancaires à la BCE atteignaient 550 milliards. En d'autres termes, le plan de relance s'est traduit par un simple jeu d'écritures au sein de la BCE. Tout le monde est content, les banquiers parce que la BCE paye plus l'argent qu'ils lui rendent que l'argent qu'ils lui prennent, les gouvernements parce que les banquiers sont contents, et les citoyens parce qu'ils sont fiers de l'action énergique de leurs gouvernements. Au vu de ce déplorable état des choses, vous verrez que l'on dira encore que c'est la faute aux matheux !

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Réduire la pollution par les médicaments

Des mesures simples permettraient de limiter les rejets de médicaments dans les eaux usées.

Jean-Marie HAGUENOER

Les médicaments contribuent beaucoup à l'augmentation de l'espérance de vie. Mais ce progrès a un revers : des résidus de produits utilisés en médecine humaine ou vétérinaire contaminent l'environnement. Ils proviennent, d'une part, des rejets urinaires et fécaux, et des médicaments non utilisés, souvent jetés à la poubelle ou dans les toilettes ; d'autre part, de l'industrie chimique et de l'industrie pharmaceutique, des hôpitaux, de l'élevage et de l'aquaculture.

Les stations d'épuration où passent tous ces résidus ne sont pas conçues spécifiquement pour les éliminer. Toutes les classes de médicaments se retrouvent dans leurs effluents, sous forme de molécules mères (les molécules métabolisées ne sont pas recherchées), à des concentrations de l'ordre du nanogramme ou du microgramme par litre. Les eaux superficielles et souterraines peuvent être contaminées. Par exemple, l'éthynylestradiol de pilules contraceptives a été détecté à des concentrations de quelques dizaines de nanogrammes par litre dans les rivières et les estuaires. Les antibiotiques peuvent rester piégés dans les sédiments et y demeurer actifs pendant des années. De plus, dans les stations d'épuration, une partie des résidus est adsorbé par les boues activées, lesquelles sont parfois épandues sur les terrains agricoles. Les végétaux destinés à l'alimentation peuvent alors être contaminés.

Plusieurs études ont montré que des molécules issues des médicaments (divers

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

anticancéreux, tel le méthotrexate, paracétamol, diazépam, parmi d'autres) peuvent passer, malgré les méthodes de purification utilisées, dans les eaux de boisson, à des doses de quelques nanogrammes par litre.

Certains de ces polluants peuvent s'accumuler dans les organismes vivants. Le cas le plus connu est celui d'un anti-inflammatoire, le diclofénac. Administré à des vaches au Pakistan, il a entraîné le déclin des populations de trois espèces de vautour se nourrissant de carcasses bovines, selon une étude publiée en 2004.

IL FAUT DÉVELOPPER une « écopharmacovigilance ».

Même si les concentrations détectées dans les eaux de boisson sont généralement infimes, on s'interroge : cette pollution a-t-elle des effets sur la santé ? À ne considérer que l'eau du robinet, le risque paraît négligeable : les quantités cumulées pendant 70 ans représentent moins d'une seule dose thérapeutique, sauf dans quelques cas comme le clenbutérol, un anabolisant « brûleur » de graisse (sur la durée d'une vie, l'eau apporte environ 25 doses de ce produit).

Mais il faut tenir compte aussi des apports alimentaires de petites doses cumulées sur plusieurs années et des effets synergiques avec d'autres polluants (bisphénol A, phtalates, PCB, dioxines, insecticides organochlorés, métaux, etc.). Les risques pour la faune et la flore sont réels : sélection de bactéries résistantes aux antibiotiques, perturbations endocriniennes, notamment. Chez l'homme, les résidus ingérés risquent d'être suffisants à certaines périodes de la vie, lorsque la sensibilité à certains polluants est la plus grande, pour provoquer des perturbations hormonales et des troubles de la reproduction, par exemple.

À défaut de connaissances précises sur ces risques sanitaires, il est primordial de limiter et contrôler les rejets : on sait le faire à la source, bien que les diverses méthodes utilisées, telle l'osmose inverse, soient relativement coûteuses. Mais aujourd'hui, les hôpitaux et les industries ne mesurent pas leurs rejets d'anticancéreux, d'hormones ou d'antibiotiques, faute de réglementation les y contraignant. La loi ne les oblige qu'à des analyses sans lien direct avec l'utilisation ou la production de médicaments, telles des mesures standards de pollution de l'eau. Or, pour connaître l'impact des polluants, il faut mettre en œuvre des tests sur cellules et sur modèles animaux, seuls à même d'évaluer les effets néfastes, mutagènes ou perturbateurs endocriniens par exemple, d'un échantillon prélevé dans l'environnement.

Il est primordial de développer en France et en Europe une nouvelle science, l'écopharmacovigilance. Des programmes de recherche sont indispensables, ainsi que des actions d'éducation dans toutes les universités, afin notamment de former les médecins à la santé environnementale.

Quant à la population, si elle doit éviter de surconsommer les médicaments, elle doit aussi rapporter systématiquement ceux qui n'ont pas été utilisés ou qui sont périmés dans les pharmacies. Depuis juin 2009, les officines sont tenues par la réglementation de collecter « gratuitement les médicaments non utilisés, contenus le cas échéant dans leurs conditionnements, qui leur sont apportés par les particuliers ». La réglementation prévoit qu'ils sont obligatoirement incinérés par des unités spécialisées conformes aux normes environnementales, qui valorisent l'énergie ainsi obtenue – la redistribution humanitaire étant en revanche interdite depuis 2008.

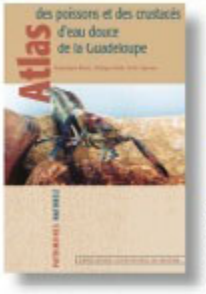
Ce dispositif est organisé par le réseau de l'association CYCLAMED, financé par les cotisations des entreprises du médicament. Sur ce plan particulier, l'augmentation récente des quantités collectées et valorisées (huit pour cent entre 2008 et 2009, soit un peu plus de 13 200 tonnes) suggère que nous sommes, peut-être, sur la bonne voie. ■

Jean-Marie HAGUENOER, professeur émérite de l'Université de Lille 2, préside la Commission santé environnement de l'Académie nationale de pharmacie.

Médicament et environnement, rapport de l'Académie nationale de pharmacie, 2008, sur www.acadpharm.org (rapports d'étude).
J.-M. Haguenoer, **Les résidus de médicaments présentent-ils un risque pour la santé publique ?**, *Santé Publique*, n° 3, pp. 325-342, 2010.
www.cyclamed.org

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Patrimoines naturels & géologiques



Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Guadeloupe

Dominique Monti
Philippe Keith
Erick Vigneux

Cet inventaire au sein du milieu dulçaquicole de la Guadeloupe a permis de recenser 14 espèces de crustacés décapodes et 16 espèces de poissons. Chacune est présentée dans une fiche synthétique (morphologie, biologie, distribution et menaces) accompagnée d'une carte de répartition et d'une photo. Deux clés de détermination complètent ce descriptif. L'ouvrage aborde aussi les différentes caractéristiques des milieux de l'archipel : géologie, relief, climat, hydrographie, originalité des peuplements aquatiques, menaces et conservation des milieux. Un tableau donne le classement UICN des espèces en danger à l'échelle de la Guadeloupe et une perspective historique permet de remettre dans leur contexte les espèces introduites et celles qui se sont acclimatées.

ISBN : 978-2-85653-648-3 • 128 p. • 23 € TTC

Stratotype Albien

Claude Colleté
coordinateur

L'Albien est un étage de l'échelle stratigraphique internationale dont le stratotype se situe dans le département de l'Aube et qui date du Crétacé. L'ouvrage, richement illustré, aborde à la fois l'historique de l'étude scientifique de cette couche, son contexte géologique, son contenu paléontologique, les paléogéographies et son utilisation par l'homme.

ISBN : 978-2-85653-657-5 • 326 p. • 35 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsci

COURRIER DES LECTEURS

Pour réagir aux articles : courrier@pourlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pourlascience.fr

✔ REMPLACER LE BISPHÉNOL A

L'article *Le bisphénol A : un danger pour la santé ?* (*Pour la Science* n° 396 - octobre 2010, http://bit.ly/pls396-bisphenol) met en évidence les risques liés aux plastiques durs. Quel produit chimique remplace désormais le bisphénol A dans les biberons ? Ce produit n'est-il pas similaire ? Ne se dégrade-t-il pas en composés semblables aux dérivés du bisphénol A ?

Félicia Berthaut, Paris

➜ RÉPONSE DE JEAN-PIERRE CRAVEDI

Pour l'instant le bisphénol A est toujours utilisé dans la fabrication des plastiques rigides, y compris ceux à usage alimentaire. Plusieurs types de matériaux sont également utilisés pour fabriquer des objets en plastique rigide à usage domestique ; les plus courants sont le PVC, le polyéthylène et le polypropylène. C'est d'ailleurs en polypropylène que sont fabriqués les biberons en plastique garantis sans bisphénol A.

Il faut noter qu'il existe d'autres bisphénols (par exemple le bisphénol F ou S), mais ils sont pour l'instant beaucoup moins utilisés que le bisphénol A et l'on connaît peu de choses sur leur éventuelle toxicité. Le polypropylène est mieux connu et ses produits de dégradation ne sont pas des perturbateurs endocriniens.

Signalons enfin que parmi les perturbateurs endocriniens figurent les phtalates qui sont incorporés dans de nombreux plastiques pour leur conférer leurs propriétés de souplesse.

✔ CAOUTCHOUC ET ALLERGIES

Dans votre article *Du caoutchouc naturel en Europe* (*Pour la science* N° 394, août 2010, *http://bit.ly/pls394-caoutchouc*), vous écrivez que, parce qu'elles se combinent aux ingrédients de la vulcanisation, 20 pour cent des protéines liées aux particules de caoutchouc peuvent provoquer des réactions allergiques. Cela signifie-til qu'un latex d'hévéa dans lequel aucun ingrédient de vulcanisation ne serait incorporé ne provoquerait aucune réaction allergique, ou en réduirait le risque ?

Daniel Deméré,
Ingénieur conseil formulation latex naturel

➜ RÉPONSE DE SERGE PALU

Lors de la centrifugation, les protéines en suspension ou dissoutes dans le latex sont entraînées avec le surnageant. Néanmoins, celles qui sont attachées à la surface des particules de caoutchouc y restent et se retrouvent, après trempage et vulcanisation, dans les objets finis.

Or elles migrent progressivement à la surface lors du stockage. Ce sont ces protéines de surface qui entraînent des réactions allergéniques chez certains patients.

On peut en éliminer une partie par lavage et essorage du produit fini après une vulcanisation partielle. Mais le mieux est de limiter la présence de protéines dans le latex naturel. Pour le latex d'hévéa, on peut utiliser du latex récupéré en surface par une opération de crémage, ce qui réduit de deux à quatre fois la teneur totale en protéines. C'est cependant une opération longue. Une autre solution est de faire une double centrifugation, mais c'est coûteux, et de ce fait réservé pour des applications très spécifiques.

© Shutterstock/Katrina Brown

Les biberons et les jouets pour nourrisson contiennent du bisphénol A, un perturbateur endocrinien. Par quoi le remplacer ?

Une autre piste est d'utiliser du latex de guayule. En effet, contrairement au latex d'hévéa, on ne l'obtient pas par saignée, mais par broyage, donc avec un lavage intensif. Il contient ainsi dix fois moins de protéines qu'un latex d'hévéa.

Par ailleurs, on ne peut totalement écarter des réactions des protéines avec les autres ingrédients de la vulcanisation (acide stéarique, antioxygène, et accélérateurs), mais, à ma connaissance, on n'a pas encore mis en évidence de réactions entre protéines et additifs chimiques.

En conclusion, moins il y a de protéines dans un latex au départ, plus faibles sont les risques de réactions allergéniques liées au latex. C'est une opportunité pour le latex de guayule.

✔ LASER SANS CAVITÉ : PAS NOUVEAU ?

Dans l'article *Le laser aléatoire : un vrai laser ?* (*Pour la science* N° 396, octobre 2010, http://bit.ly/pls396-laser), les auteurs donnent à la cavité un rôle essentiel. Or des lasers sans cavité existent depuis longtemps. Par exemple, dans l'édition de juin 1974 de *Scientific American*, Jim Small décrit la façon de construire à la maison un laser à azote qui fonctionne sans cavité résonante. Ce laser n'a pas besoin de cavité, car le gain du milieu est énorme : de l'ordre de 2 tous les 20 millimètres.

L. Peralta

➜ RÉPONSE DE CHRISTIAN VANNESTE

Il existe en effet un certain nombre de lasers dits « sans miroirs » dont le gain est suffisamment élevé pour pouvoir fonctionner sans cavité. Le laser à azote en est un exemple à la longueur d'onde de 337 nanomètres. On pourrait aussi en citer d'autres comme le laser à hydrogène, certains lasers à excimère, des lasers à gaz comme le laser hélium-néon à 3,39 micromètres, certains lasers à colorants ou à semi-conducteurs. Cependant, si cette liste semble importante, la majorité des lasers connus ne fonctionnent pas sans cavité. Il en est de même pour les lasers aléatoires. Sans le milieu diffusant, les lasers aléatoires ne fonctionneraient pas. Le milieu diffusant joue donc un rôle indispensable, comme la cavité d'un laser classique.

Il est intéressant de noter que si la directivité des lasers sans miroirs peut être assez bonne, leur cohérence temporelle reste en général très moyenne. Ces lasers sont donc intermédiaires entre un oscillateur laser cohérent et une source thermique incohérente. Par contraste, les lasers aléatoires se caractérisent par une directivité médiocre, mais par une assez bonne cohérence temporelle, du moins en principe. La notion de laser sans cavité peut ainsi couvrir plusieurs réalités physiques différentes.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

L'Univers
a-t-il jamais commencé ?

Graphisme et photo de la couverture : © Atelier Michel Bouvet - photo de l'auteur : Philippe Matsas © Flammarion

Flammarion

VRAI OU FAUX

Les hommes ont-ils de la cellulite ?

Non, c'est rare. Car le tissu graisseux des hommes ne se situe pas sous la peau, mais dans la cavité abdominale.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE

Le terme de cellulite est impropre : il signifie « inflammation de la cellule ». Or on désigne par cellulite un aspect particulier de la peau qui ressemble à de la « peau d'orange ». Ce sont les femmes qui en ont le plus et qui en parlent le plus. Mais les hommes sont-ils aussi concernés ? Nous allons voir que peu d'hommes en ont, à cause d'une répartition différente de leurs graisses.

La cellulite résulte d'une désorganisation du tissu de soutien et de cohésion du tissu adipeux. Ce dernier contient les cellules graisseuses, ou adipocytes, qui mettent en réserve les lipides ; il est présent partout dans l'organisme, dans l'abdomen, autour de chaque organe et sous la peau. Le tissu graisseux sous-cutané est peu actif d'un point de vue métabolique : il stocke les graisses, mais les libère rarement dans le sang, car c'est un tissu de réserve peu utilisé (ses graisses sont consommées en cas de jeûne prolongé ou d'allaitement par exemple). En revanche, le tissu adipeux abdominal est très actif : ses graisses sont facilement libérées dans le sang. Pour cette raison, on considère que l'obésité abdominale est dangereuse pour la santé.

Les cellules graisseuses sont organisées et soudées entre elles par un réseau extracellulaire de protéines, qui contient notamment du collagène et de la fibronectine. Ce réseau assure une répartition homogène des cellules, de sorte que le tissu graisseux est lisse. Or la cellulite apparaît quand cette trame de soutien des cellules graisseuses se désorganise.

Les graisses abdominales existent davantage chez les hommes alors que le tissu graisseux sous-cutané est surtout féminin. En effet, les hormones sexuelles déterminent la localisation des cellules graisseuses : les estrogènes (ou hormones féminines) favorisent une mise en réserve des graisses sous la peau à des endroits jugés peu esthétiques selon les critères de beauté du XXIe siècle (dans les fesses, le haut des cuisses et des bras) ; les hormones masculines stimulent un stockage des graisses dans l'abdomen. Mais la cellulite ne se voit que lorsque le tissu graisseux est sous-cutané, c'est-à-dire chez les femmes.

Inéluctable cellulite...

Pourquoi le réseau de soutien des adipocytes se désorganise-t-il ? Il y a trois causes. La première est constitutive, c'est-à-dire que le réseau extracellulaire est génétiquement déstructuré ; dans ce cas (où des facteurs de prédisposition à la cellulite existent), rien ne peut empêcher la formation de cellulite, même chez une femme mince (elle a peu de tissu graisseux et ses adipocytes sont petits). La présence de cellulite ne dépend pas uniquement du nombre et de la taille des adipocytes. La deuxième cause est une fibrose, un vieillissement du tissu adipeux. Tous les tissus de l'organisme vieillissent et produisent trop de certaines protéines du réseau de soutien, tel le collagène. Un tel excès de protéines déstructure le réseau. La dernière raison est la rétention d'eau. S'il y a trop d'eau dans le tissu graisseux, la trame se déstructure encore davantage.

Selon Philippe Valet, directeur de l'Equipe INSERM Sécrétions adipocytaires, obésités et pathologies associées de l'Université Paul Sabatier à Toulouse, ces causes existent aussi bien chez les hommes que chez les femmes ; mais les hommes ont peu, voire pas du tout, de tissu graisseux sous-cutané. Le tissu graisseux de l'homme dans la cavité abdominale reste invisible de l'extérieur, même s'il est désorganisé par une fibrose. Seul un homme en surpoids ou obèse peut développer de la cellulite au niveau de la ceinture abdominale. À la ménopause, la femme produit moins d'estrogènes : elle accumule alors de la graisse dans l'abdomen, mais peut perdre la graisse sous-cutanée.

Cellulite ou « peau d'orange »

© Shutterstock / Stephane Bidouze

Peut-on éliminer la cellulite ? On ne peut pas combattre la fibrose ni la cellulite constitutive. En revanche, on peut drainer l'eau par des massages, ce qui lisse la peau momentanément... Mais l'eau ne tarde pas à s'installer à nouveau. Il est aussi possible de limiter la consommation de sel pour éviter la rétention d'eau.

Si les hommes ont rarement de la cellulite, les femmes aussi peuvent y échapper, si elles n'ont pas de facteurs génétiques de prédisposition à la cellulite et si elles ne sont pas en surpoids. En effet, quand on grossit, non seulement la taille, mais aussi le nombre des cellules graisseuses augmentent (dans un espace limité), ce qui accroît le risque de désorganiser les fibres de soutien.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE est journaliste à **Pour la Science.**

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

POUR LA SCIENCE

vous fait découvrir toujours plus d'actualités scientifiques

© shutterstock/Cosmo

Abonnez-vous !

Pour la Science 12 numéros **+** **Les Dossiers** 4 numéros

1 an • 76 €

Soit les Dossiers offerts !

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science*** (12 nos et leur version numérique) **+ *les Dossiers*** (4 nos et leur version numérique)
1 an • **76 €** au lieu de ~~102,50 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France) 16 € par an, autres pays 35 € par an.

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* seul** (12 nos et leur version numérique)
1 an • **56 €** au lieu de ~~74,70 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* version web** (12 nos)
1 an • **48 €**

❑ 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 : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél.** : _____

E-mail** : _____

Je règle par :

❑ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

❑ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

Code de sécurité*** _____

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

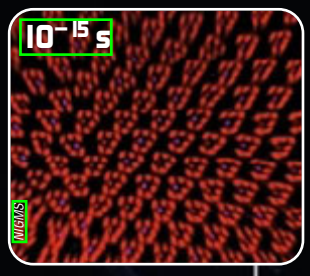
PLS397

Les jalons du temps

Les échelles de temps accessibles à la science actuelle s'étendent sur plus de 40 ordres de grandeur, du monde subatomique à celui de la cosmologie. Un défi à notre imagination.

Temps de Planck : 10^{-43} s

C'est l'échelle de temps obtenue en combinant les trois constantes fondamentales de la physique (la vitesse de la lumière, la constante de gravitation et la constante de Planck). Seule une théorie mariant la relativité générale à la physique quantique permettrait de comprendre ce qui se passe à cette échelle, ainsi qu'à l'échelle de longueur correspondante (la longueur de Planck, 10^{-35} mètre).



1 femtoseconde (fs) : 10^{-15} s

Les changements de conformation des molécules en interaction avec d'autres ou sous l'effet d'une excitation durent 100 à 200 femtosecondes. Par exemple, dans la rétine *(ici de drosophile)*, le rétinal contenu dans le pigment des photorécepteurs change de conformation sous l'effet de la lumière en moins de 200 femtosecondes, déclenchant une suite de réactions biochimiques qui crée un message nerveux.

1 attoseconde (as) : 10^{-18} s

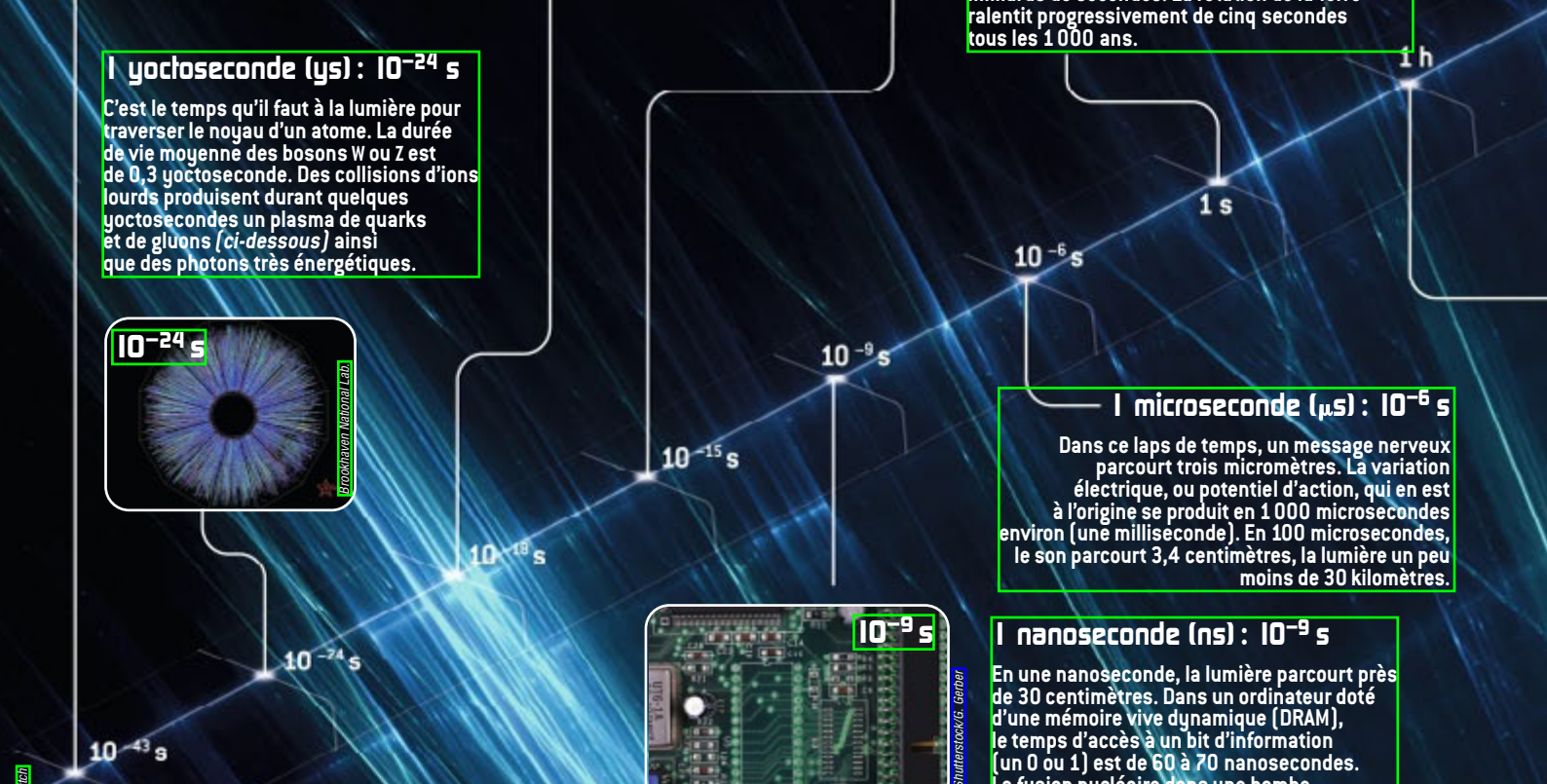
En une attoseconde, la lumière parcourt 0,3 millionième de millimètre, soit la taille d'une petite molécule. En 2008, des chercheurs allemands et américains ont produit dans le domaine des rayons X des impulsions laser d'environ 80 attosecondes, soit les plus brèves à ce jour *(ci-contre)*. De telles impulsions permettent d'observer ou de contrôler le mouvement des électrons dans les atomes et les molécules.

1 seconde (s)

Équivalent de 1/86 400 du jour solaire moyen. En une seconde, la lumière parcourt 299 792 458 mètres. Par définition, la seconde est « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, au repos, à une température de 0 kelvin ». Les horloges atomiques au césium ne dévient que d'une seconde au bout de 100 millions d'années. Un homme de 64 ans a vécu environ deux milliards de secondes. La rotation de la Terre ralentit progressivement de cinq secondes tous les 1 000 ans.

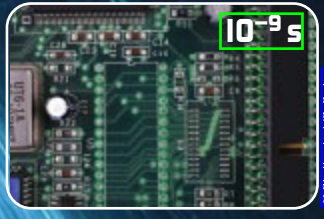
1 yoctoseconde (ys) : 10^{-24} s

C'est le temps qu'il faut à la lumière pour traverser le noyau d'un atome. La durée de vie moyenne des bosons W ou Z est de 0,3 yoctoseconde. Des collisions d'ions lourds produisent durant quelques yoctosecondes un plasma de quarks et de gluons *(ci-dessous)* ainsi que des photons très énergétiques.



1 microseconde (µs) : 10^{-6} s

Dans ce laps de temps, un message nerveux parcourt trois micromètres. La variation électrique, ou potentiel d'action, qui en est à l'origine se produit en 1 000 microsecondes environ (une milliseconde). En 100 microsecondes, le son parcourt 3,4 centimètres, la lumière un peu moins de 30 kilomètres.



1 nanoseconde (ns) : 10^{-9} s

En une nanoseconde, la lumière parcourt près de 30 centimètres. Dans un ordinateur doté d'une mémoire vive dynamique (DRAM), le temps d'accès à un bit d'information (un 0 ou 1) est de 60 à 70 nanosecondes. La fusion nucléaire dans une bombe à hydrogène dure 20 à 40 nanosecondes.

© Shutterstock/DrHitch

1 milliard d'années

C'est ce qu'il a fallu à la vie pour apparaître sur Terre après la formation de la planète, 3,5 milliards d'années plus tôt. Dans un milliard d'années, le Soleil sera devenu trop chaud pour que la vie sur Terre soit encore possible. Quatre milliards d'années de plus, et notre étoile deviendra une géante rouge, éjectant de la matière comme c'est le cas dans la Nébuleuse de l'œil de chat *(ci-contre)*, puis finira en naine blanche.

1 000 milliards d'années

Durée de vie possible des naines rouges, étoiles peu massives, les plus nombreuses de l'Univers. D'ici 10^{12} ans, tous les éléments créés lors du Big Bang auront disparu ou seront noyés dans ceux produits par les étoiles.

1 million d'années : 31,6 × 10^{12} s

C'est l'unité de l'échelle des temps géologiques. La période du Quaternaire a ainsi débuté il y a 2,588 millions d'années et l'ère du Cénozoïque il y a 65,5 millions d'années. Les premiers hominidés sont apparus il y a 7 millions d'années ; c'est un peu moins de trois fois le temps mis par la lumière pour nous parvenir depuis la galaxie d'Andromède.

10^{14} a

10^{12} a

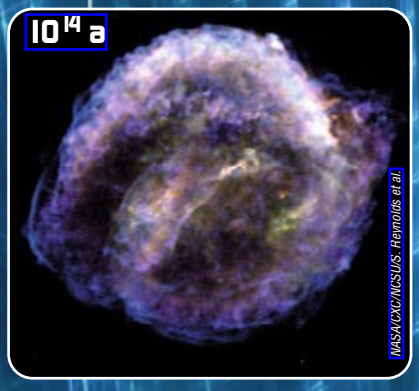
10^{9} a

10^{6} a

10^{5} a

1 a

1 j



100 000 milliards d'années

Ce futur lointain verra la mort des dernières étoiles de l'Univers, parfois sous forme de supernovae *(ci-contre, à droite, la supernova de Kepler)*. De nombreux noyaux atomiques mettent plus de temps à disparaître ; la demi-vie du tellure 128 est ainsi de 2,2 × 10^{24} années. Et les derniers protons finiront de se désintégrer dans 10^{200} ans !

1 année : 31 556 926 s

L'année sidérale est le temps de révolution complète de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire ce que met le Soleil pour retrouver la même position sur la sphère céleste ; soit 365 jours 6 heures 9 minutes et 9,8 secondes (365,25636 jours). L'année solaire ou tropique, durée séparant deux équinoxes, représente 365 jours 5 heures 48 minutes 45 secondes en moyenne (365,24219 jours). Notre calendrier grégorien prend un jour de retard sur l'année tropique tous les 3 300 ans.

100 000 ans : 3 160 × 10^{9} s

C'est le temps que met la lumière pour traverser notre galaxie, ou encore la galaxie de la Vierge *(ci-dessous)*, distante de la nôtre de 56 millions d'années-lumière. C'est aussi approximativement le temps écoulé depuis l'expansion de l'homme moderne hors d'Afrique.

1 jour : 86 400 s

Durée de la rotation complète de la Terre sur elle-même. Le jour sidéral, mesuré en référence à un point de la sphère céleste, dure 23 heures 56 minutes et 4,09 secondes. Le jour solaire, intervalle de temps séparant deux passages du Soleil au méridien, vaut en moyenne 24 heures, soit 86 400 secondes. L'activité de tous les organismes vivants varie selon un cycle d'environ 24 heures, nommé rythme circadien.

1 heure : 3 600 s

En une heure, la lumière parcourt 1,08 milliard de kilomètres. Depuis Pluton, elle nous parvient en 5 heures et 20 minutes. Une cellule vivante se divise en une à quelques heures, selon l'organisme. Un embryon de mammifère *(ci-dessus)* met quelques dizaines d'heures pour avoir huit cellules.

L'instant présent unique, mais banal

Étienne Klein

L'instant présent, l'instant passé et l'instant futur sont indissociables dans la perception que nous avons du temps. La conscience rend le temps continu. Pourtant, l'instant présent, celui qui existe maintenant, est singulier. Peut-on définir le temps indépendamment de notre subjectivité ?

J'ai cessé de croire aux « grands événements » qui s'accompagnent de hurlements et de fumée. Et crois-moi, je te prie, cher vacarme d'enfer, les plus grands événements, ce ne sont pas nos heures les plus bruyantes, mais les heures du plus grand silence.

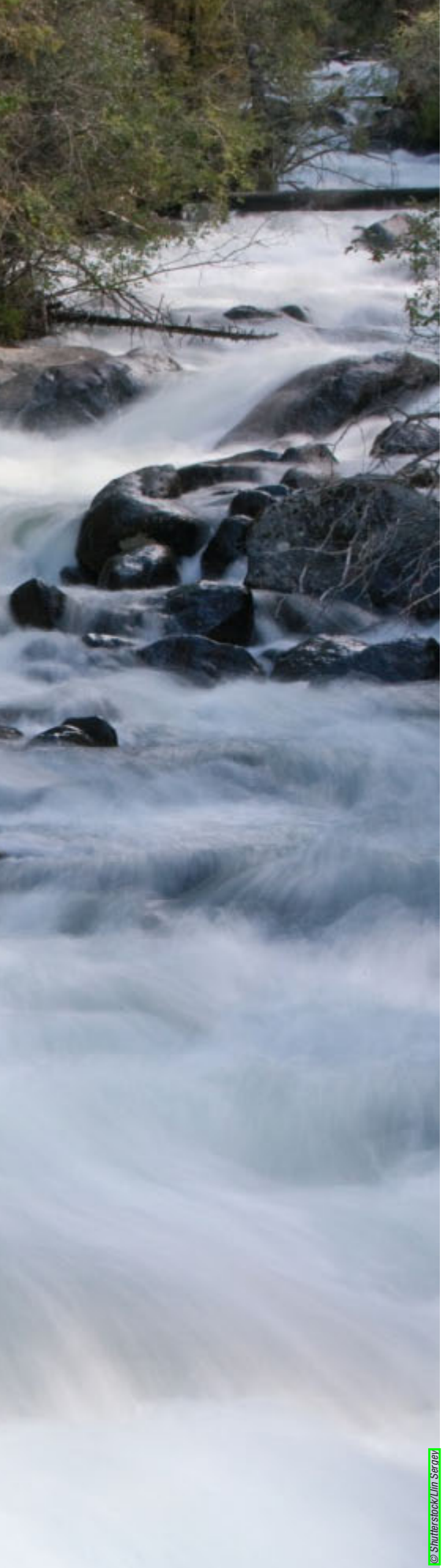
Nietzsche, *Ainsi parlait Zarathoustra*

La métaphore du fleuve a accompagné presque toute l'histoire de la pensée du temps – du moins en Occident – et continue d'irriguer notre façon de l'évoquer et de le représenter : verbalement, le temps demeure solidement arrimé à l'image d'un fluide qui s'écoule ; graphiquement, il est figuré par une ligne droite, sorte d'abstraction du fleuve, dont le sens d'écoulement est indiqué par une petite flèche.

Mais en réalité, il se pourrait que cette figuration soit en partie trompeuse, car elle nous conduit à attribuer au temps les propriétés de la ligne par laquelle on le représente. En d'autres termes, le fait de décrire le temps par une ligne lui confère *ipso facto* des « problèmes de ligne ». Kant l'avait déjà relevé : « Nous représentons la suite du temps par une ligne qui se prolonge à l'infini et dont les diverses parties constituent une série qui n'a qu'une dimension, et nous concluons des propriétés de cette ligne à toutes les propriétés du temps, avec cette seule exception que les parties de la première sont simultanées, tandis que celles du second sont toujours successives. »

En effet, cette représentation aiguise et concentre certains problèmes d'ordre philosophique. Par exemple, elle n'explicite pas comment la ligne du temps se construit : est-ce l'instant présent qui la parcourt progressivement ou n'advient-elle que point par point, un instant présent après l'autre ? Et à quoi tient ce que nous nommons l'écoulement du temps ? Quel est son moteur ? Est-ce le temps même ? L'Univers ? Nous-mêmes ?

1. LE TEMPS S'ÉCOULE. Cette métaphore associant le temps et un fluide a conduit à représenter le temps sous forme d'une ligne orientée. Or, contrairement au temps, une ligne est continue. Cette image est trompeuse.



© Shutterstock/Lin Sergey

Le simple fait de poser ces questions renvoie à une question que soulevait Henri Bergson dans *Durée et simultanéité* : comment du successif peut-il être engendré par du juxtaposé ? Comment des points placés sur une ligne droite, d'apparence spatiale, parviennent-ils à se temporaliser ? Comment peut-il n'en apparaître qu'un seul à la fois ?

Tout récemment, le physicien américain Lee Smolin a attiré l'attention de ses confrères sur cette énigme, qu'il appréhende comme une difficulté conceptuelle majeure entravant l'avancement de la physique, notamment lorsqu'il s'agit d'unifier la relativité générale et la physique quantique, ou, de façon très simplifiée, le monde de l'infiniment grand et celui de l'infiniment petit : « Quand on représente graphiquement un mouvement dans l'espace, le temps est représenté comme s'il n'était qu'une autre dimension spatiale. Le temps est comme gelé. […] Il faudrait trouver une manière de dégeler le temps, de le représenter sans le transformer en espace. » Pour ce faire, il faudrait pouvoir identifier et caractériser le véritable moteur du temps : est-il physique, objectif, ou intrinsèquement lié à notre rapport au monde ? Si c'est cette dernière hypothèse qui est la bonne, est-ce la conscience qui joue le rôle de médiatrice entre le monde et nous ? Est-ce elle qui formate et temporalise notre rapport au monde ?

L'alliance du passé immédiat et du futur imminent

Tel qu'il est figuré sur la ligne du temps physique, l'instant présent a une durée nulle. Il se concentre en un point. Point qui symbolise notre connexion actuelle à la ligne du temps. Mais la perception que nous en avons n'est jamais aussi concentrée. Car notre conscience épaissit l'instant présent, émousse sa brillance, le dilate en durée. Elle l'habille de son voisinage, l'enveloppe d'une rémanence de ce qu'il a contenu à l'instant précédent et d'une anticipation de ce qu'il contiendra à l'instant suivant.

Ainsi, lorsque nous écoutons un air de musique, nous percevons bien que la note précédente est comme retenue avec la note présente qui se projette elle-même dans la note suivante. Le présent, lorsqu'il disparaît, laisse toujours une trace

L'ESSENTIEL

- **Sur la ligne du temps, l'instant présent est un point.**
- **Le présent exclut le passé et le futur, mais en est indissociable.**
- **Notre conscience unifie les instants discontinus du temps de la physique, les « atomes de temps », de sorte que cette dimension devient continue et homogène.**
- **Le passé et le futur se pensent par rapport au présent. Ce temps perçu diffère du temps physique qui ne fait qu'établir l'ordre chronologique de ce qui a eu lieu avant, après ou en même temps qu'un événement de référence.**

Les propriétés antagonistes du temps

Dès le début du XVII[e] siècle, Pierre Gassendi (1592-1655), mathématicien, philosophe et astronome, avait noté que le présent est contaminé par des propriétés antagonistes : à ceux qui objectaient « que le temps n'est rien parce que, consistant par hypothèse en une partie passée, une partie présente et une partie future, la partie passée n'est plus, la partie future n'est pas encore, la partie présente s'évanouit complètement », il rétorquait que c'est « un paralogisme [un non-sens], puisqu'on traite alors des choses de différentes natures comme si elles étaient de même nature […]. Ceux qui appliquent une catégorie valable pour une espèce de choses à une autre espèce de choses font comme s'ils mesuraient une ligne droite avec quelque chose de courbe, un poids de quelque chose avec une mesure de longueur, une longueur avec une mesure de poids ». À la question : « Est-il vrai que rien, en dehors de ce qui est permanent, ne peut exister ? », Gassendi répondait que notre embarras venait d'une limitation de notre vocabulaire : « Évidemment, rien ne peut exister d'une manière permanente, excepté ce qui est permanent ; mais ce qui est successif peut exister à sa manière, c'est-à-dire successivement. Sans aucun doute, nous manquons d'un simple mot pour exprimer l'existence totale qui, n'étant pas simultanée, n'est pas contenue seulement dans le présent, mais aussi dans le passé et dans le futur. »

dans la conscience, en même temps qu'il y préfigure son prolongement : une sorte d'alliance continue du passé immédiat et du futur imminent s'établit au sein du présent perçu. Sans cette alliance, il n'y aurait pas de mélodie à proprement parler. Ainsi, notre conscience du présent unifie-t-elle – ou rassemble-t-elle – des instants successifs qui ne coexistent pas dans le temps physique. Car pour la physique, deux instants qui se succèdent n'existent pas ensemble.

Vue sous cet angle, la représentation du passage du temps par une ligne, qui nous semble si naturelle, apparaît plutôt comme le résultat d'une opération compliquée. Elle revient en effet à considérer que deux événements distincts et successifs s'excluent l'un l'autre d'une existence simultanée, mais qu'ils appartiennent à une même série.

Saisir le passage du temps, c'est en somme procéder à une lecture à la fois analytique et intégrative de la suite des instants : un ensemble de points, au départ sans corrélation, s'organise en une ligne continue, devenant un continuum temporel. C'est cette capacité intégrative de la conscience qui nous permet d'imaginer qu'existe un « cours du temps ». D'ailleurs, lorsqu'elle vient à faire défaut, on se retrouve dans la situation du malheureux père Bourdin évoquée par Descartes : « J'ai connu quelqu'un qui en s'endormant avait entendu, un jour, sonner quatre heures, et avait fait ainsi le compte : une, une, une, une ; et devant l'absurdité de sa conception, il s'était mis à crier : "Voilà l'horloge qui est folle : elle a compté quatre fois une heure !" » Ce monsieur croyait que, ayant sonné quatre heures, l'horloge avait sonné quatre fois une heure : chaque nouvelle sonnerie de l'horloge lui paraissait la répétition de la sonnerie précédente et n'apportait à ses oreilles aucune information supplémentaire.

La perception du temps comme un passage, imbriquant le futur, le présent et le passé, nécessite donc bel et bien une double opération de la pensée : il faut non seulement distinguer le présent, seul existant, et exclure le passé et le futur, mais aussi – en même temps – appréhender à la fois l'instant présent, l'instant passé et l'instant futur, les penser dans leur appartenance à une même série ; il n'y a pas un instant, puis un autre ; il y en a un, puis un deuxième, puis un troisième. Ce qui suppose que le premier et le deuxième n'existent plus lorsqu'est présent le troisième, mais que quelque chose d'eux demeure qui permet de penser les trois instants comme appartenant à un même tout.

L'intervention d'une conscience « intégrante » semble donc nécessaire à la conceptualisation d'un cours du temps qui soit continu et homogène, qui ne soit pas une agglomération chaotique d'atomes de temps. Est-ce à dire que le cours du temps dépend lui-même de la conscience ? Ou existe-t-il de façon autonome par rapport au sujet conscient ?

Au sein de la ligne du temps, le présent occupe, pour nous, une place singulière. Il nous apparaît même unique, radicalement différent de tous les autres instants, puisqu'il est celui où nous sommes… présents. Un instant n'est d'ailleurs qualifié de présent qu'en référence à nous : la seule chose qui le distingue *a priori* de ses congénères est que cet instant-là accueille notre présence. Pourtant, sur la ligne qui représente le temps physique, c'est un instant singulièrement… banal : rien ne semble le distinguer des instants qui le précèdent ni de ceux qui le suivent, si ce n'est que nous le déclarons présent.

De prime abord, la mathématisation du temps semble banaliser le présent en lui ôtant toute spécificité par rapport aux autres instants : par définition, tout instant du temps est, a été ou sera présent. Dès lors, une question se pose : par quoi l'instant présent, physiquement si quelconque, devient-il, pour nous, si singulier ? Sa particularité vient-elle de nous ou lui est-elle intrinsèque ? En d'autres termes, existe-t-il un présent du monde (qui peut n'être que local), ou ce que nous appelons le présent ne fait-il que marquer notre présence au monde ? Ou encore, la notion de présent a-t-elle besoin de la présence d'un observateur pour prendre corps ?

L'observateur crée-t-il le temps ?

Avant de voir si la physique est en mesure – ou pas – de nous aider à répondre à ces questions, notons que nos discours philosophiques sur le présent sont souvent contradictoires. Par exemple, nous disons que le temps passe, puisque l'instant présent n'est jamais strictement le même, et aussi qu'il ne passe pas, puisque nous ne quittons un instant présent que pour en retrouver un autre. Ainsi le présent apparaît-il toujours contaminé par des qualités antagonistes : il conjugue la présence et l'absence, la singularité et la continuité, le surgissement et l'effacement, la mobilité et l'immobilité, la variation et la persistance.

Pareil statut ne semble pouvoir conduire qu'à des non-sens, qui ont des effets d'ordre intellectuel dans la mesure où ils nous rendent incapables de bien penser la ligne du temps « tout entière ». Nous ne parvenons jamais à l'apprécier vraiment : tantôt principe du changement, tantôt enveloppe de toute chronologie ; tantôt assimilée à la furtivité, tantôt à une arène statique, en attente de ce qui viendra s'y produire ; tantôt conçue comme un être purement physique, ou au contraire, comme un produit de la conscience.

Quel est, en somme, le statut de l'instant présent ? Est-il ce par quoi le temps se donne à nous ou ce par quoi nous

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

nous situons dans le temps ? Cette question est d'autant plus délicate que nous disposons, sinon de deux concepts, du moins de deux expériences distinctes du temps. Que trouvons-nous, en effet, dans notre langage courant pour dire le temps ? D'une part, des expressions telles que « avant », « après », « pendant » et, d'autre part, des expressions comme « présent », « passé », « futur ». Les premières n'expriment que des relations (d'antériorité, de postériorité, de simultanéité) entre des événements quelconques ; les secondes sont des attributs temporels qui font intervenir un instant privilégié, l'instant présent, celui qui existe maintenant.

Relations et attributs temporels constituent ainsi le squelette intelligible de tous nos discours sur le temps. Les relations strictement chronologiques, celles d'antériorité, de postériorité et de simultanéité entre événements, sont objectives et indépendantes de nous. Elles ne changent pas à mesure que le temps passe : il demeurera toujours vrai que Newton est né avant Einstein. Tandis que les attributs temporels changent avec le présent qui change, le même événement étant tour à tour futur, présent, passé : de ce qui se passe aujourd'hui, nous dirons demain que cela s'est passé hier, alors que ce qui se passe avant ne pourra jamais s'être passé après.

Peut-on réduire les attributs temporels aux seules relations chronologiques ? Cette question a divisé les philosophes, surtout depuis que le métaphysicien américain John McTaggart a publié en 1908 un article dont l'enjeu peut être résumé de la façon suivante : l'expérience que nous faisons du temps est marquée par le fait que ce qui arrive advient toujours au présent, et que la seule réalité, ou du moins la première réalité, nous semble être celle du présent. Au présent nous sentons, au présent aussi nous nous remémorons ce qui n'est plus, et au présent encore nous forgeons le projet, dans la crainte ou le désir, de ce qui n'est pas encore.

Le temps, tel qu'il nous apparaît, est défini par ces trois déterminations, le présent, temps premier, par rapport auquel se disent ou se pensent le passé et l'avenir. En revanche, si nous tentons de penser ce qu'est le monde en imaginant que nous n'y sommes pas présents, si nous essayons de dire ce qu'il serait sans nous, nous avons alors le sentiment que ces trois déterminations perdent leur sens et qu'elles n'ont aucune réalité en elles-mêmes.

Il semble bien que le concept « physique » du temps, objectif et naturel, indépendant de notre situation temporelle, ne comporte pas en lui-même ces trois déterminations, mais seulement trois relations fixes entre les événements : « antérieurement à », « postérieurement à », « en même temps que » (ou « avant », « après », « pendant »). La question se pose donc de savoir si le temps lui-même est ou non pensable à l'aide de ces seules relations (nommées relations B par McTaggart) – ou bien si cela nécessite, en outre, les déterminations présent/passé/futur (nommées relations A par McTaggart).

L'AUTEUR

Etienne KLEIN est physicien, directeur de recherche au CEA, où il dirige le Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM).

2. UN JOUR, UNE HEURE, une minute, une seconde... La conscience rend continue notre perception du temps qui, pourtant, n'est constitué que de « particules de temps » discontinues.

© Shutterstock/Dimitri_PL'S

Telle semble être l'opposition, héritière de toute l'histoire de la pensée, qui divise la plupart des doctrines philosophiques du temps. Pour les unes – représentées au XX^{e} siècle par le philosophe américain d'origine allemande, Rudolf Carnap, et le philosophe et logicien britannique Bertrand Russell (mais déjà par Leibniz et en premier lieu par Aristote) –, le temps peut être pensé comme un simple ordre d'antériorité/postérité. Selon eux, les déterminations temporelles peuvent être réduites, logiquement et physiquement, aux relations B : le présent, le futur ou le passé ne sont que des déterminations subjectives – psychologiques –, et ce qui existe en réalité, ce sont seulement des relations temporelles entre événements.

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ peine à rendre compte de la présence du présent, ni n'explique ce que l'instant présent peut avoir de si spécial par rapport aux autres moments de la vie.

Selon les autres doctrines, généralement celles des « philosophes de la conscience » (Henri Bergson, Edmund Husserl, Maurice Merleau-Ponty et, en tout premier lieu, saint Augustin), le temps ne peut être pensé sans les idées de présent, de passé et de futur, parce que ces déterminations temporelles, notamment celle de présent, sont irréductibles.

Dans le premier cas, le temps est conçu comme un ordre de succession, qui déploie des chronologies définitives. Dans le second, il est conçu comme le passage d'un instant particulier, comme le transit du présent vers le passé et de l'avenir vers le présent.

Le statut particulier du *Maintenant*

La physique, notamment celle du XX^{e} siècle qui a si profondément modifié ses représentations du temps, est-elle devenue capable d'affronter ces questions ? Est-elle partisane d'une « philosophie du concept », ne voyant dans la ligne du temps que le déploiement d'une chronologie sans référence particulière au présent ? Ou pourrait-elle sous-tendre une « philosophie de la conscience » qui accorderait toute sa place à la perception que nous avons de l'instant qui passe ?

En fait, elle ne s'engage guère sur ces terrains. Pour le moment du moins. Notamment parce que la notion de « maintenant » demeure pour elle un problème aigu : en effet, la théorie de la relativité peine à rendre compte de la « présence du présent », ni n'explique ce que l'instant présent peut avoir de si spécial par rapport aux autres moments du temps.

À la fin de sa vie, Albert Einstein se disait lui-même troublé par ce problème du « statut du maintenant » dans la théorie qu'il avait élaborée. Dans son « autobiographie intellectuelle », Carnap rapporte à ce propos une anecdote intéressante : « Un jour, Einstein me dit que le problème du *Maintenant* le tracassait sérieusement. Il m'expliqua que l'expérience du *Maintenant* a pour l'homme une signification spéciale qui la différencie radicalement de celle du passé et du futur, mais que cette différence ne peut être mise en évidence au sein de la physique. Que cette expérience ne puisse être prise en charge par la science lui semblait aussi navrant qu'inévitable. Je lui fis remarquer que tout ce qui a objectivement lieu devrait pouvoir être décrit par la science : d'un côté, la succession temporelle des événements par la physique ; de l'autre, l'expérience particulière que l'homme a du temps, y compris ses appréhensions différentes du passé, du présent et du futur, peut être décrite et (en principe) expliquée par la psychologie. Mais Einstein pensait que les descriptions scientifiques ne sont pas faites pour combler nos attentes d'êtres humains ; qu'il y a quelque chose d'essentiel à propos du *Maintenant* qui demeure hors du domaine de la science. »

La structuration mathématique du temps physique rendant équivalent chacun de ses instants, il reste à comprendre la singularité qu'a chaque instant présent pour chacun d'entre nous. La physique pourra-t-elle, à elle seule, résoudre ce problème ? Cela supposerait qu'elle devienne capable de décrire, en termes exclusivement physiques, l'intégralité de notre expérience du temps. Mais si le cours du temps est au contraire dépendant de notre subjectivité, en quelque façon, si la conscience que nous en avons joue un rôle dans sa dynamique, à quelles autres sciences devra-t-elle faire appel ? Aux sciences cognitives ? Aux neurosciences ? Les réponses à ces questions sont âprement discutées et nul consensus n'est en vue. Nous n'en avons pas tout à fait fini avec le temps.

BIBLIOGRAPHIE

É. Klein, **Discours sur l'origine de l'Univers**, Flammarion, 2010.

É. Klein, **Le facteur temps ne sonne jamais deux fois**, Flammarion, 2007.

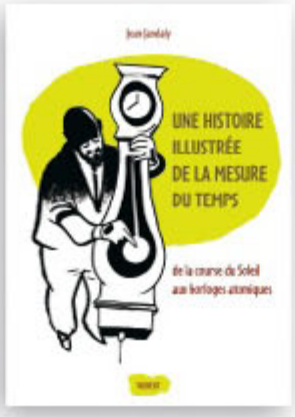
L. Smolin, **Rien ne va plus en physique !**, Dunod, coll. Quai des sciences, 2007.

É. Klein, **Les tactiques de Chronos**, Flammarion, coll. Champs, 2004.

E. Kant, **Critique de la raison pure**, PUF, 1781, édition 1971.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Gabriel Gohau
0-00122, 22 €, juin 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

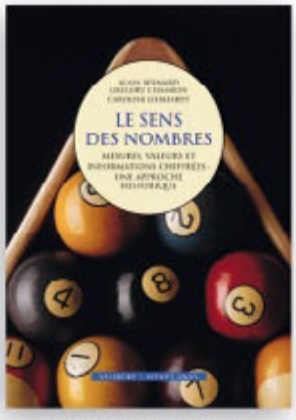


Jean Jandaly
7-24932, 20 €, juin 2009

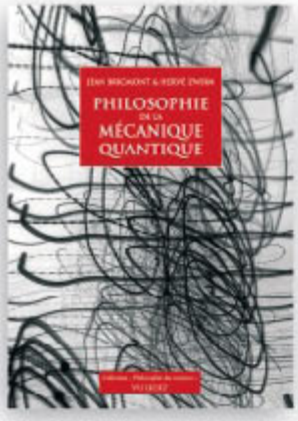
Laurence Maurines & *al.*
0-01884, 42 €, août 2010

Jens Høyrup
0-00016, 20 €, août 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

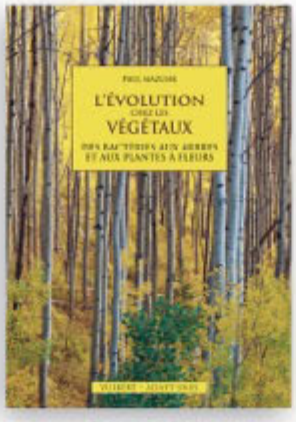
Michel Blay
0-01464, 17 €, mai 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES



Alain Bernard & *al.*
0-00160, 19 €, juillet 2010
Coédition ADAPT-SNES



Jean Bricmont & Hervé Zwirn
7-20743, 15 €, août 2009
Collection « Philosophie des sciences »
Coédition SPS



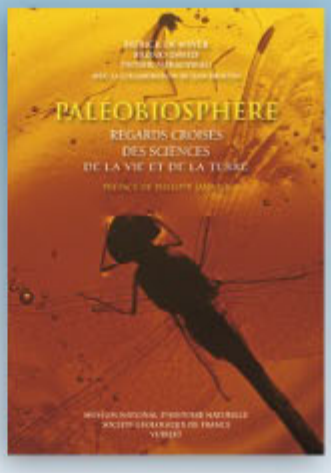
Paul Mazliak
7-20767, 42 €, novembre 2009
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

Sciences 2010 VUIBERT

Brian Hayes
Traduit de l'anglais (USA) par Jean-Louis Basdevant
0-01129

« Seuls – pour le moment – dans un univers sans écho, nous sommes réduits à évaluer le temps qui passe et celui qui est passé tandis que, par son développement, sa croissance et son tribut à la sélection naturelle, chaque être vivant contribue à une épopée dont on entrevoit à peine le début et dont nous n'osons guère imaginer l'issue »

Philippe Janvier (préface à *Paléobiosphère*)



Patrick De Wever & *al.*
7-25038, 79 €, juillet 2010
Collection « Interactions »
Coédition SGF/MNHN

www.Vuibert.fr

Le temps est-il une illusion ?

Craig Callender

1. DANS CERTAINES DE SES ŒUVRES, l'artiste américain Keith Peters explore l'idée qu'un monde intrinsèquement statique puisse néanmoins donner une impression de dynamisme.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Pendant que vous lisez cette phrase, vous pensez probablement que le moment présent, là maintenant, correspond à ce qui est en train de se passer. Vous sentez que l'instant présent a quelque chose de particulier. Il est réel. Vous pouvez vous rappeler le passé ou anticiper l'avenir, mais vous vivez dans le présent. Bien sûr, le moment où vous avez lu cette première phrase n'a plus cours. Le moment où vous lisez celle-ci l'a remplacé. En d'autres termes, nous avons la sensation d'un écoulement du temps. Notre intuition profonde est que le futur est ouvert jusqu'à ce qu'il devienne le présent, et que le passé est fixé. À mesure que le temps s'écoule, cette structure de passé fixé, présent immédiat et avenir ouvert se décale dans un sens, toujours le même. Cette structure est inscrite dans notre langage, nos pensées et notre comportement.

Pourtant, aussi naturelle que soit cette conception, la science ne la reflète pas. Les équations de la physique ne nous disent pas quels événements sont en train de se passer juste maintenant ; on peut en effet comparer ces équations à une carte où le symbole « Vous êtes ici » est absent. De plus, les théories de la relativité d'Albert Einstein suggèrent non seulement qu'il n'existe pas un unique présent particulier, mais que tous les instants sont également réels.

La divergence entre la compréhension scientifique du temps et l'intuition que nous en avons préoccupe les penseurs depuis longtemps. Elle n'a fait qu'augmenter à mesure que les physiciens dépouillaient le temps de la plupart des attributs dont nous le revêtons d'ordinaire. Aujourd'hui, le fossé entre le temps de la physique et le temps de l'expérience humaine atteint sa conclusion logique : beaucoup de théoriciens sont arrivés à croire que, fondamentalement, le temps n'existe même pas.

L'idée de l'inexistence du temps est si étonnante qu'il est difficile de voir comment elle pourrait être cohérente. Tout ce que nous faisons est ancré dans le temps. Le monde est une série d'événements reliés les uns aux autres par les fils du temps. N'importe qui peut constater que mes cheveux grisonnent, que les objets bougent, etc. Nous observons du changement, qui correspond à des variations de propriétés par rapport au temps. Sans le temps, le monde serait immobile. Mais comment une théorie dépourvue de temps pourrait-elle expliquer que nous observons des changements ?

Le temps vu comme un concept émergent

Même si le temps n'existe pas au niveau fondamental, il peut apparaître à des niveaux supérieurs, de la même façon qu'une table est solide alors qu'elle n'est qu'un assemblage de particules constituées, pour l'essentiel, d'espace vide. La solidité est une propriété collective, ou émergente, des particules. Le temps aussi pourrait être une propriété émergente des ingrédients élémentaires du monde.

Ce concept de temps émergent est potentiellement révolutionnaire. Einstein affirmait que l'étape clef du développement de la théorie de la relativité avait été de repenser le temps. À l'heure où les théoriciens poursuivent son ambition d'unir la relativité générale avec la physique quantique, beaucoup jugent que sans une réflexion approfondie sur le temps, il sera impossible de progresser.

L'idée intuitive que nous avons du temps a connu une succession de revers au fil des progrès de la physique. Commençons par le temps de la physique classique, dite newtonienne. Les lois du mouvement de Newton sous-entendent que le temps est doté d'un certain nombre de caractéristiques.

Tous les observateurs s'accordent en général sur l'ordre dans lequel les événements se déroulent. Quels que soient l'instant et le lieu où un événement se produit, la physique classique suppose que l'on peut objectivement dire s'il a eu lieu avant, après ou en même temps que n'importe quel autre événement. Le temps permet donc d'ordonner complètement tous les événements de l'Univers. La simultanéité

Le temps n'est peut-être pas une entité fondamentale. D'après certains physiciens, il pourrait émerger à notre perception dans le cadre d'un monde parfaitement statique.

L'ESSENTIEL

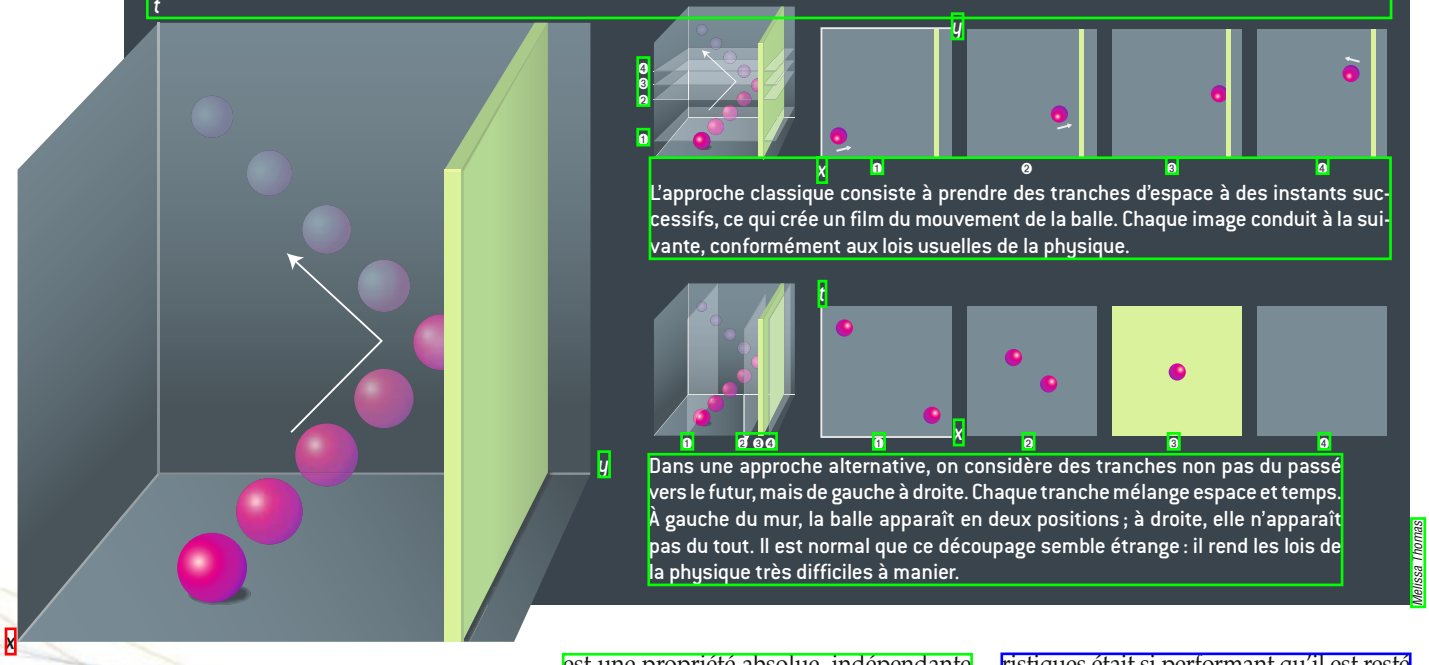
- **La recherche d'une théorie unifiée force les physiciens à réexaminer les concepts les plus fondamentaux. Le temps est l'un d'eux.**
- **Certains prétendent que le temps n'existe pas. D'autres pensent que si. Une position intermédiaire est que le temps existe, mais qu'il n'est pas fondamental. Un monde statique le ferait apparaître à notre perception.**
- **Ce que nous percevons comme étant le temps pourrait ne refléter que les relations entre les différents sous-systèmes de l'Univers.**

Keith Peters

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

EN QUOI LE TEMPS EST DIFFÉRENT DE L'ESPACE

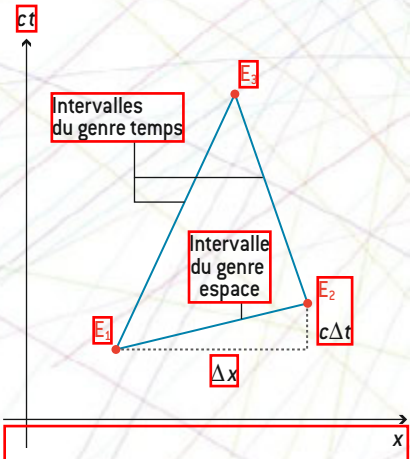
Physiciens, artistes et graphistes représentent d'ordinaire le temps comme une dimension supplémentaire de l'espace. L'espace-temps ainsi construit est représenté ici, avec une dimension spatiale de moins, comme un bloc tridimensionnel dans lequel une balle rebondit sur un mur. Selon la théorie de la relativité, où l'espace et le temps ne sont pas indépendants, l'espace-temps peut être découpé de différentes façons. Mais toutes ne sont pas aussi judicieuses.



L'approche classique consiste à prendre des tranches d'espace à des instants successifs, ce qui crée un film du mouvement de la balle. Chaque image conduit à la suivante, conformément aux lois usuelles de la physique.

Dans une approche alternative, on considère des tranches non pas du passé vers le futur, mais de gauche à droite. Chaque tranche mélange espace et temps. À gauche du mur, la balle apparaît en deux positions ; à droite, elle n'apparaît pas du tout. Il est normal que ce découpage semble étrange : il rend les lois de la physique très difficiles à manier.

Melissa Thomas



2. DANS L'ESPACE-TEMPS, deux événements séparés par un intervalle du « genre espace », c'est-à-dire tel que $c\,\Delta t < \Delta x$ (où c est la vitesse de la lumière), ne peuvent influer l'un sur l'autre (cas des événements E_1 et E_2). Pour qu'il puisse y avoir un lien de causalité, l'intervalle doit être du « genre temps » ($c\,\Delta t > \Delta x$) : un signal lumineux a alors le temps d'aller d'un événement à l'autre (cas de E_1 et E_3, ainsi que de E_2 et E_3).

est une propriété absolue, indépendante de l'observateur. De plus, le temps doit être continu afin que l'on puisse définir la vitesse et l'accélération.

Le temps classique doit également être doté d'une notion de durée permettant de quantifier ce qui sépare les événements dans le temps. Pour dire qu'un guépard peut courir à 110 kilomètres par heure, nous devons avoir une mesure de ce qu'est une heure. Et tout comme l'ordre des événements, la durée est indépendante de l'observateur en physique newtonienne.

Pour l'essentiel, Newton supposait donc que le monde est muni d'une horloge maîtresse. La physique newtonienne écoute le tic-tac de cette horloge et d'aucune autre. Newton pensait en outre que le temps s'écoule et que cet écoulement définit une flèche indiquant le futur ; mais ces caractéristiques supplémentaires ne sont pas strictement exigées par les lois newtoniennes.

Le temps de Newton peut nous sembler suranné, mais en y réfléchissant un peu, on peut remarquer à quel point cette conception est étonnante. Ses nombreuses caractéristiques (ordre, continuité, durée, caractère absolu de la simultanéité, écoulement et flèche d'écoulement) sont, en toute logique, indépendantes ; mais l'horloge maîtresse que Newton nommait « temps » les regroupe toutes. Et ce cocktail de caractéristiques était si performant qu'il est resté intact durant près de deux siècles.

Puis vinrent les assauts de la fin du XIXe siècle et du début du XXe. Le premier fut donné par Ludwig Boltzmann. Ce physicien autrichien fit remarquer que comme les lois de Newton sont tout aussi valides lorsqu'on renverse le temps (autrement dit, ces lois restent inchangées si l'on y change la variable temporelle t en son opposée, $-t$), le temps n'est pas doté d'une flèche intrinsèque. Pour Boltzmann, la distinction entre passé et futur n'est pas inhérente au temps, mais émerge des asymétries dans l'organisation de la matière dans l'Univers. Bien que les détails de cette proposition soient encore débattus, Boltzmann avait de manière convaincante dépossédé le temps newtonien de l'une de ses caractéristiques.

Einstein lança l'assaut suivant en éliminant la simultanéité absolue. D'après sa théorie de la relativité restreinte, la détermination des événements qui se produisent au même instant dépend du mouvement de l'observateur. La véritable arène des événements n'est ni le temps ni l'espace, mais leur réunion : l'espace-temps. Deux observateurs se déplaçant à des vitesses différentes ne seront pas d'accord sur l'instant ni sur le lieu où se produit un événement, mais ils seront d'accord sur sa localisation

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

dans l'espace-temps. L'espace et le temps sont ainsi des concepts plus secondaires.

Einstein n'a fait qu'empirer les choses en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, qui étend la relativité restreinte à des situations où la gravitation est présente. La gravitation déforme le temps, de telle sorte que l'écoulement d'une seconde ici peut ne pas signifier la même chose que l'écoulement d'une seconde ailleurs. Sauf dans de rares cas, il est alors impossible de synchroniser des horloges et d'obtenir qu'elles restent synchronisées. Il n'est plus possible de considérer que le monde évolue seconde après seconde en étant régi par un unique paramètre temporel. Il devient alors impossible de dire qu'un événement s'est produit avant ou après un autre *(voir l'article de Marc Lachièze-Rey)*.

Le temps était déjà déchu en 1915

La relativité générale met en jeu de nombreuses notions où apparaît le mot « temps » : coordonnée temporelle, temps propre, temps global... Elles remplissent collectivement de nombreuses tâches qui incombaient au temps unique de Newton, mais, isolément, aucune d'elles ne s'impose. Soit la physique n'écoute pas ces horloges, soit, si elle le fait, ces horloges ne s'appliquent qu'à de petites portions de l'Univers ou à des observateurs particuliers. Les physiciens d'aujourd'hui s'émeuvent de ce qu'une théorie unifiée devra éliminer le temps, mais on peut raisonnablement dire que le temps était déjà passé à la trappe en 1915 et que nous ne l'avons pas encore tout à fait intégré.

On serait tenté de penser que la différence entre l'espace et le temps a presque disparu, et que la véritable arène des événements est quadridimensionnelle. La relativité semble transformer le temps en une simple dimension (ou direction) supplémentaire dans cette arène. L'espace-temps est comme une miche de pain que l'on peut découper en tranches de différentes façons, arbitrairement nommées « espace » ou « temps ».

Pourtant, même en relativité générale, le temps conserve une fonction distincte et importante : celle de distinguer localement entre les directions « du genre temps » et celles « du genre espace ». Les événements séparés par un intervalle du genre temps sont ceux qui peuvent être causalement reliés *(voir la figure 2)* – des événements tels qu'un objet ou un signal peut passer de l'un à l'autre, et ainsi l'influencer. Deux événements séparés par un intervalle du genre espace sont sans relation causale. Aucun objet ou signal ne peut passer de l'un à l'autre.

Les différents observateurs ne sont pas d'accord sur la succession des événements séparés par des intervalles du genre espace, mais ils sont tous d'accord sur l'ordre des événements séparés par des intervalles du genre temps. Et si, pour un observateur, un événement peut en provoquer un autre (par causalité), il en est de même pour tous les autres observateurs.

Il y a deux ans, dans un essai, j'explorais ce que signifie cette caractéristique du temps. Imaginons que l'on découpe en tranches l'espace-temps du passé vers le futur ; chaque tranche est la totalité tridimensionnelle de l'espace à un instant donné *(voir l'encadré page précédente)*. La somme de toutes ces tranches d'événements (dans chaque tranche, les événements sont séparés par des intervalles du genre espace) est l'espace-temps quadridimensionnel. Alternativement, imaginons que l'on regarde le monde de travers et qu'on le découpe dans ce sens. Dans cette perspective, chaque tranche tridimensionnelle est un étrange amalgame d'événements séparés par des intervalles du genre espace et d'autres séparés par des intervalles du genre temps.

La première méthode est familière aux physiciens ou aux cinéphiles. Les images d'un film représentent des tranches d'espace-temps : elles montrent l'espace à des instants successifs. Un peu comme les passionnés de cinéma qui devinent l'intrigue et prédisent la suite de l'histoire racontée par le film, les physiciens peuvent prendre une seule tranche spatiale complète et reconstruire ce qui se passe dans les autres tranches spatiales, simplement en appliquant les lois de la physique.

Un découpage étrange

La seconde méthode de découpage n'a pas d'analogie simple. Elle correspond au découpage de l'espace-temps non pas du passé vers le futur, mais d'Est en Ouest. Un exemple d'une telle tranche pourrait être le mur Nord d'une maison et tout ce qui arrivera à ce mur dans le futur. À partir de cette tranche, les lois de la physique permettraient de reconstituer le reste de la maison (et même le reste de l'Univers).

L'AUTEUR

Craig CALLENDER
est professeur de philosophie à l'Université de Californie à San Diego, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

S. M. Carroll, **From Eternity to Here : The Quest for the Ultimate Theory of Time**, Dutton, 2010.

C. Callender, **Introducing Time**, Totem Books, 2005.

B. Greene, **La magie du cosmos**, Robert Laffont, 2005.

L. Smolin, **Des atomes d'espace et de temps**, *Pour la Science*, n° 316, février 2004.

R. Healey, **« Can physics coherently deny the reality of time ? »**, dans C. Callender, *Time, Reality & Experience*, University of Cambridge, 2002.

C. Rovelli, **Relational quantum mechanics**, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 35(8), pp. 1637-1678, 1996. arxiv.org/abs/quant-ph/9609002

SUR LE WEB

FQXi FORUM : The Nature of Time Essay Contest, sur : http://www.fqxi.org/community/forum/category/10 (voir en particulier les essais de Claus Kiefer, Carlo Rovelli, Julian Barbour et Craig Callender).

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Cela vous semble étrange ? C'est normal. Il n'est pas évident que les lois de la physique vous permettent de le faire. Mais comme le mathématicien Walter Craig, de l'Université McMaster au Canada, et le philosophe Steven Weinstein, de l'Université de Waterloo (Canada), l'ont récemment montré, c'est possible, du moins dans certaines situations simples.

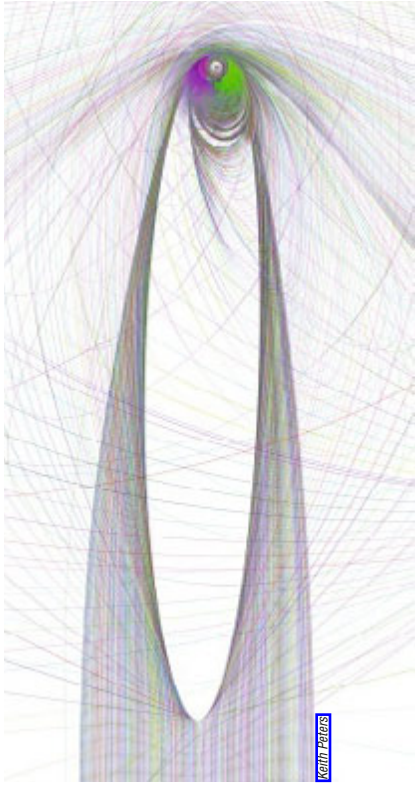
Bien qu'en principe, les deux méthodes de découpage de l'espace-temps soient possibles, elles diffèrent profondément. Dans le découpage usuel, du passé vers le futur, les données qu'il est nécessaire de recueillir sur une tranche sont, en théorie, assez faciles à obtenir. Par exemple, si l'on mesure les vitesses de toutes les particules, la vitesse d'une particule en un endroit est indépendante de la vitesse d'une autre particule ailleurs. Mais dans la seconde méthode de découpage, les propriétés des particules ne sont pas indépendantes ; elles sont entremêlées de façon très particulière. Il faudrait combiner des mesures extrêmement compliquées sur ces particules pour obtenir les informations nécessaires. Et encore, ces mesures ne permettraient de reconstituer l'espace-temps entier que dans des cas particuliers, comme ceux découverts par W. Craig et S. Weinstein.

Le temps, une direction qui simplifie les choses

Dans un sens bien précis, le temps est la direction de l'espace-temps dans laquelle de bonnes prédictions sont possibles, la direction dans laquelle nous pouvons raconter les histoires les plus informatives. Le récit de l'Univers ne se déroule pas dans l'espace ; il se déroule dans le temps.

L'un des objectifs les plus ambitieux de la physique moderne est de réunir la relativité générale et la physique quantique en une théorie unique qui prenne en compte les aspects tant gravitationnels que quantiques de la matière : une théorie quantique de la gravitation. Cette ambition se heurte à plusieurs écueils ; en particulier, la mécanique quantique impose au temps certaines propriétés qui contredisent ce que j'ai dit jusqu'ici.

La mécanique quantique affirme que les objets ont un répertoire de comportements bien plus riche que ce que nous pouvons saisir avec des grandeurs classiques telles que position et vitesse. La description complète d'un objet est donnée par une entité mathématique nommée état quantique. Cet état évolue de façon continue dans le temps, et les physiciens sont capables de calculer la probabilité que tel ou tel résultat expérimental soit obtenu à tel ou tel instant. Si l'on envoie un électron à travers un dispositif qui le défléchit soit vers le haut, soit vers le bas, la mécanique quantique peut ne pas être en mesure de nous dire avec certitude à quel résultat s'attendre. Au lieu de cela, l'état quantique ne donne que la probabilité des différents résultats possibles ; par exemple, 25 pour cent de chances que l'électron parte vers le haut, et 75 pour cent de chances qu'il soit dévié vers le bas. Deux systèmes décrits par des



états quantiques identiques peuvent ainsi donner des résultats différents.

Les prédictions probabilistes de la théorie exigent du temps certaines caractéristiques. Tout d'abord, le temps est ce qui rend les contradictions possibles. Quand on lance un dé, il ne peut pas tomber sur 3 et sur 5 en même temps. Il ne peut le faire qu'à des instants différents. Cette caractéristique est liée au fait que la probabilité de tomber sur chacune des six faces doit être égale à 100 pour cent, sinon le concept de probabilité perdrait tout son sens. Les probabilités s'additionnent à un instant donné, pas à un endroit donné. Il en va de même des probabilités que les particules quantiques aient une position ou une quantité de mouvement données.

Ensuite, l'ordre temporel des mesures quantiques importe. Supposons que l'on fasse passer un électron à travers un dispositif qui le défléchit d'abord verticalement, puis horizontalement, et que l'on mesure son moment cinétique lorsqu'il sort du dispositif. On répète l'expérience, cette fois en déviant l'électron horizontalement, puis verticalement, et l'on mesure à nouveau le moment cinétique. Les valeurs obtenues seront très différentes.

Un écueil quantique

Enfin, un état quantique fournit les probabilités pour tout l'espace à un instant donné. Si l'état englobe une paire de particules, alors le fait de mesurer l'une des particules affecte instantanément l'autre, indépendamment de l'endroit où elle se trouve ; c'est la célèbre « fantomatique action à distance » qui troublait tant Einstein à propos de la mécanique quantique. Cette corrélation instantanée le chagrinait pour la bonne raison que si les particules réagissent en même temps, alors cela signifie que l'Univers est muni d'une horloge maîtresse, ce que la relativité interdit expressément.

Bien que certaines de ces questions restent controversées, le temps en mécanique quantique est essentiellement une régression au temps de la mécanique newtonienne. Les physiciens se préoccupent de l'absence de temps en relativité, mais le rôle central du temps en mécanique quantique pose peut-être un problème plus grave. C'est pour cette raison profonde que l'unification de la relativité générale et de la physique quantique est si difficile.

De nombreux programmes de recherche ont visé à unir la relativité générale et la physique quantique. Ils se répartissent schématiquement en deux groupes. Les physiciens qui pensent que la mécanique quantique offre le fondement le plus solide, comme les théoriciens des supercordes, ont pour point de départ un temps pur et dur. Ceux qui croient que la relativité générale fournit le meilleur point de départ démarrent avec une théorie où le temps est déjà déchu et sont donc plus ouverts à l'idée d'une réalité atemporelle.

Certes, la distinction entre ces deux approches est floue. Les théoriciens des supercordes ont récemment envisagé des théories dépourvues de temps. Mais pour

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

A-T-ON VRAIMENT BESOIN DU TEMPS ?

Pour certains physiciens, le temps est comme une monnaie, qui rend le monde plus facile à décrire, mais qui n'a pas d'existence propre. Mesurer les processus en termes de temps pourrait être équivalent à utiliser de l'argent plutôt que de faire du troc.

bien faire comprendre les problèmes fondamentaux que pose le temps, je vais me concentrer sur la seconde approche, dont le principal exemple est la théorie de la gravitation quantique à boucles, elle-même issue de la première théorie de la gravitation quantique, dite canonique.

La théorie canonique a émergé dans les années 1950 et 1960, quand les physiciens ont exprimé les équations de la gravitation d'Einstein sous la même forme que les équations de l'électromagnétisme. L'idée était que les techniques ayant été utilisées pour construire la théorie quantique de l'électromagnétisme s'appliqueraient aussi à la gravité. Ainsi, à la fin des années 1960, les physiciens John Wheeler et Bryce DeWitt sont parvenus à un étrange résultat. L'équation (dite de Wheeler-DeWitt) était totalement dépourvue de variable temporelle. Le symbole *t* désignant le temps avait tout bonnement disparu.

Des équations où le temps a disparu

Les physiciens sont restés perplexes des décennies durant. Si l'on prend le résultat à la lettre, le temps n'existe pas vraiment. Carlo Rovelli, de l'Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, l'un des créateurs de la gravitation quantique à boucles, et le physicien anglais Julian Barbour sont les deux partisans les plus en vue de cette idée. Ils ont tenté de réécrire la mécanique quantique d'une façon qui ne fasse pas intervenir le temps, comme semble l'exiger la relativité *(voir l'article de Carlo Rovelli)*.

Ils pensent que cette manœuvre est possible parce que la relativité générale, bien que dépourvue de temps global, parvient encore à décrire le changement. Pour l'essentiel, cette théorie le fait en reliant les systèmes physiques directement les uns aux autres plutôt qu'à travers une notion abstraite de temps global.

Dans les expériences de pensée d'Einstein, les observateurs établissent la chronologie des événements en comparant des horloges utilisant des signaux lumineux. On pourrait décrire la variation de la position d'un satellite en orbite autour de la Terre en termes des battements de l'horloge de votre cuisine, ou *vice-versa*. Ce que l'on fait, c'est décrire les corrélations entre deux objets physiques sans faire intervenir de temps global comme intermédiaire. Au lieu de décrire la couleur de mes cheveux comme changeante dans le temps, on peut la corréler avec l'orbite du satellite. Au lieu de dire qu'une balle de base-ball accélère à dix mètres par seconde carrée, on peut la corréler aux changements d'un glacier. Et ainsi de suite. Le temps devient redondant. Le changement peut être décrit sans lui.

Ce vaste réseau de corrélations est si bien organisé que l'on peut y définir une entité nommée « temps » et tout y relier ; on se débarrasse ainsi du fardeau consistant à suivre toutes les relations directes entre les phénomènes. Les physiciens sont ainsi en mesure de résumer de manière compacte les rouages de l'Univers, en termes de lois physiques qui se jouent dans le temps.

Virtuel comme l'argent

Mais cette commodité ne doit pas nous faire croire que le temps est une entité fondamentale. L'argent aussi nous facilite beaucoup la vie, en nous évitant de faire du troc à chaque fois que nous voulons boire un café ou manger un morceau de pain. Mais c'est une grandeur fictive inventée pour les choses auxquelles nous accordons de la valeur, pas une entité qui a de la valeur en soi. De façon analogue, le temps nous permet de relier des systèmes physiques les uns aux autres sans qu'il soit nécessaire de comprendre exactement comment un glacier est relié à une balle de base-ball. Mais le temps est lui aussi une invention commode qui n'existe pas plus fondamentalement dans la nature que l'argent.

Se débarrasser du temps a un certain attrait, mais cela entraîne certaines difficultés. Entre autres, il faut repenser la

mécanique quantique. Prenons le célèbre exemple du chat de Schrödinger. Ce chat, dont le sort dépend de l'état d'une particule quantique, est suspendu entre la vie et la mort. Dans la représentation classique, le chat devient l'un ou l'autre après une mesure ou un processus équivalent. Mais C. Rovelli prétendrait que le sort du chat n'est jamais déterminé. La pauvre bête peut être morte vis-à-vis d'elle-même, vivante par rapport à un humain présent dans la pièce, morte par rapport à un autre humain dans la pièce d'à côté, et ainsi de suite.

Une chose est de faire dépendre de l'observateur le moment de la mort du chat, comme dans la relativité restreinte ; une autre, encore plus surprenante, est que la mort du chat elle-même soit relative, comme le suggère C. Rovelli, en poussant l'esprit de la relativité à son extrême. Le temps fait tellement partie de notre intuition que son éviction transformerait la vision que les physiciens ont du monde.

Une question pressante pour quiconque épouse la gravitation quantique atemporelle est d'expliquer pourquoi le monde a une temporalité apparente. La relativité générale elle non plus n'intègre pas le temps au sens newtonien, mais au moins elle possède divers substituts partiels qui, ensemble, se comportent comme le temps newtonien quand la gravité est faible et les vitesses relatives petites. L'équation de Wheeler-DeWitt ne laisse même pas la place à ces substituts. J. Barbour et C. Rovelli ont chacun proposé des suggestions sur la manière dont le temps, ou du moins son illusion, pourrait surgir de rien. Mais la gravitation quantique canonique offre déjà une idée plus développée.

Connue sous le nom de temps semi-classique, elle remonte à un article de 1931 du physicien anglais Nevill Mott qui décrivait la collision entre un noyau d'hélium et un atome plus gros. Pour modéliser le système total, Mott utilisait une équation où le temps ne figure pas, et qu'on n'applique généralement qu'aux systèmes statiques. Il décomposait alors le système en deux sous-systèmes et utilisait le noyau d'hélium comme « horloge » pour l'atome. Remarquablement, l'atome obéit, par rapport au noyau, à l'équation usuelle de la mécanique quantique, mais où une fonction spatiale remplace le paramètre temps.

Ainsi, même quand le système dans son ensemble est atemporel, les éléments individuels ne le sont pas. Un temps pour le sous-système se cache dans l'équation atemporelle du système total.

Quelque chose d'assez similaire a lieu avec la gravitation quantique, comme l'a argumenté Claus Kiefer, de l'Université de Cologne, suivant en cela les pas de Thomas Banks, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et d'autres. L'Univers est peut-être dépourvu de temps, mais si on le décompose, certaines de ses parties peuvent servir d'horloges aux autres. Le temps émerge ainsi de l'atemporalité. Nous percevons le temps parce que nous sommes, par nature, un de ces éléments de l'Univers.

Reconstituer le temps de l'expérience

Pour intéressante et étrange que soit cette idée, elle nous laisse un peu sur notre faim. L'Univers ne peut pas toujours être décomposé en éléments qui servent d'horloges et, dans ce cas, la théorie ne fait pas de prédictions probabilistes. Le traitement de ces situations nécessitera une théorie complète de la gravitation quantique, et il faudra repenser le temps encore plus en profondeur.

Les physiciens sont partis du temps structuré de l'expérience, le temps d'un passé fixé, du présent et d'un futur ouvert. Ils l'ont petit à petit démantelé, et il n'en reste plus grand-chose. Les chercheurs doivent désormais inverser ce raisonnement et reconstruire le temps de l'expérience, peut-être à partir d'un réseau de corrélations entre éléments d'un monde fondamentalement statique.

Le philosophe français Maurice Merleau-Ponty avançait que le temps lui-même ne s'écoule pas vraiment, et que cet écoulement apparent est un produit du fait « que nous mettons subrepticement dans le ruisseau un témoin de sa course ». En d'autres termes, la tendance à croire que le temps s'écoule vient du fait que nous oublions de nous mettre nous-mêmes et nos relations avec le monde dans le tableau. Merleau-Ponty parlait de notre expérience subjective du temps, et jusque récemment personne n'avait deviné que le temps objectif pourrait lui-même s'expliquer comme résultant de ces relations. Le temps pourrait n'exister qu'en éclatant le monde en sous-systèmes et en regardant ce qui les relie. Dans ce tableau, le temps physique émerge parce que nous nous considérons comme distincts de tout le reste.

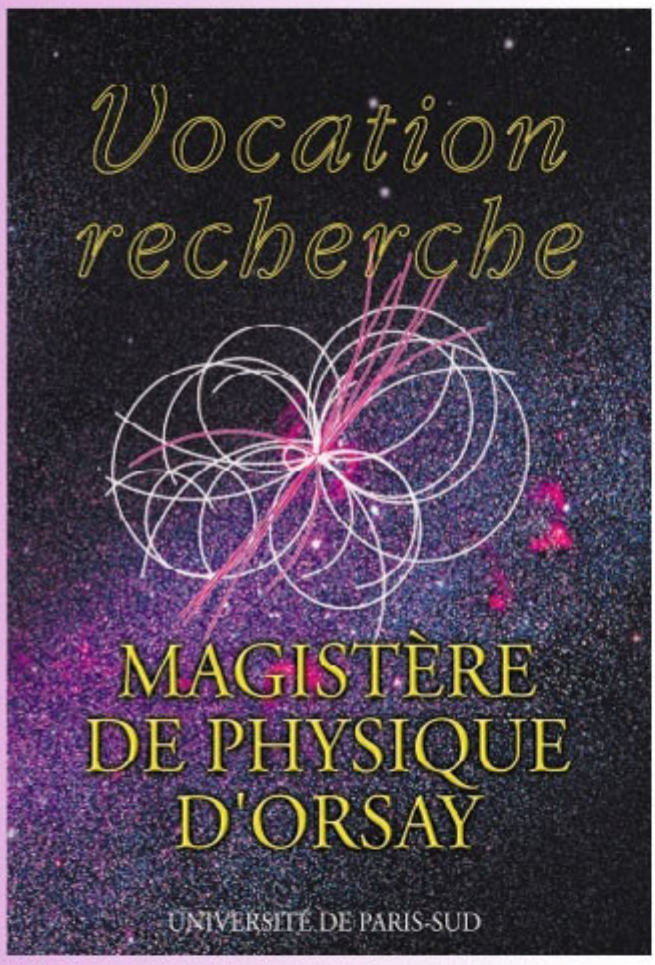
LES DÉFENSEURS DE L'ÉCOULEMENT DU TEMPS

Tous les physiciens ne pensent pas que le monde est, par essence, intemporel. L'une des idées alternatives les plus intéressantes est la « théorie des ensembles causaux », développée par Rafael Sorkin et David Rideout de l'Institut Perimeter (PI) pour la physique théorique du Canada. Elle suppose que le monde est un ensemble d'événements qui croît à mesure que de nouveaux événements voient le jour selon des règles probabilistes. Ils espèrent que le processus reproduit les caractéristiques de l'espace-temps que nous percevons, y compris l'écoulement du temps. Reste cependant à déterminer si ce processus produit des univers compatibles avec la théorie de la relativité.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

UNIVERSITE PARIS-SUD11 - ORSAY

MAGISTÈRE de PHYSIQUE FONDAMENTALE d'ORSAY



RECHERCHE
ENSEIGNEMENT
INDUSTRIE

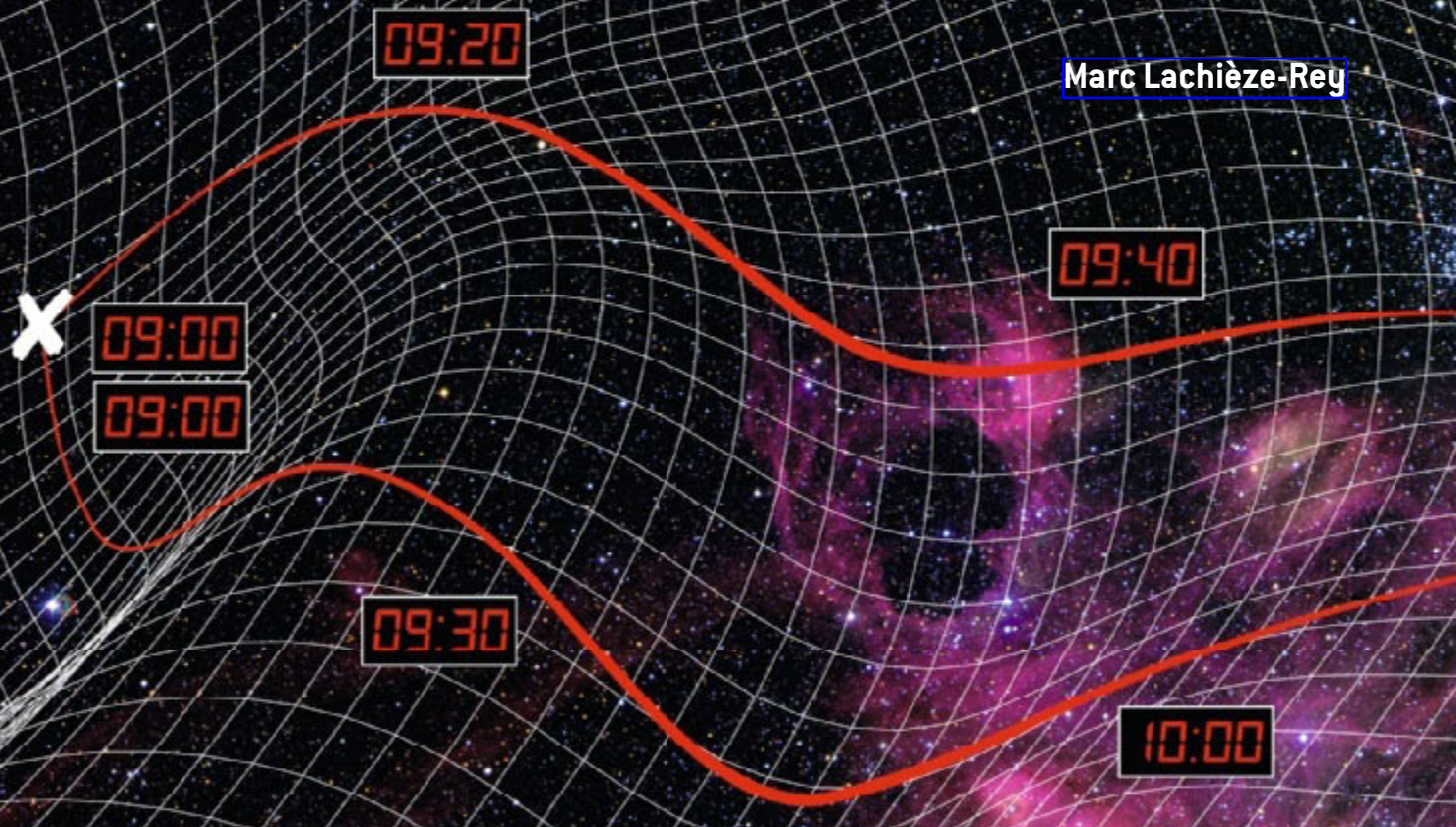
http://www.magistere.u-psud.fr/
magistere-physique.sciences@u-psud.fr
Tél : 01 69 15 58 52

- *Une formation complète et approfondie à la recherche et par la recherche en physique incluant les diplômes nationaux de Licence et Master*
- *Un large choix d'options permettant un parcours personnalisé : tous les secteurs de la physique fondamentale et appliquée, mais aussi la physique médicale, le génie nucléaire, la biophysique, la géophysique, l'électronique, l'informatique, ...*
- *Une préparation spécifique à l'AGREGATION de physique*
- *Une possibilité d'intégrer sur titre les meilleures Ecoles d'Ingénieurs*
- *Une très large ouverture internationale*

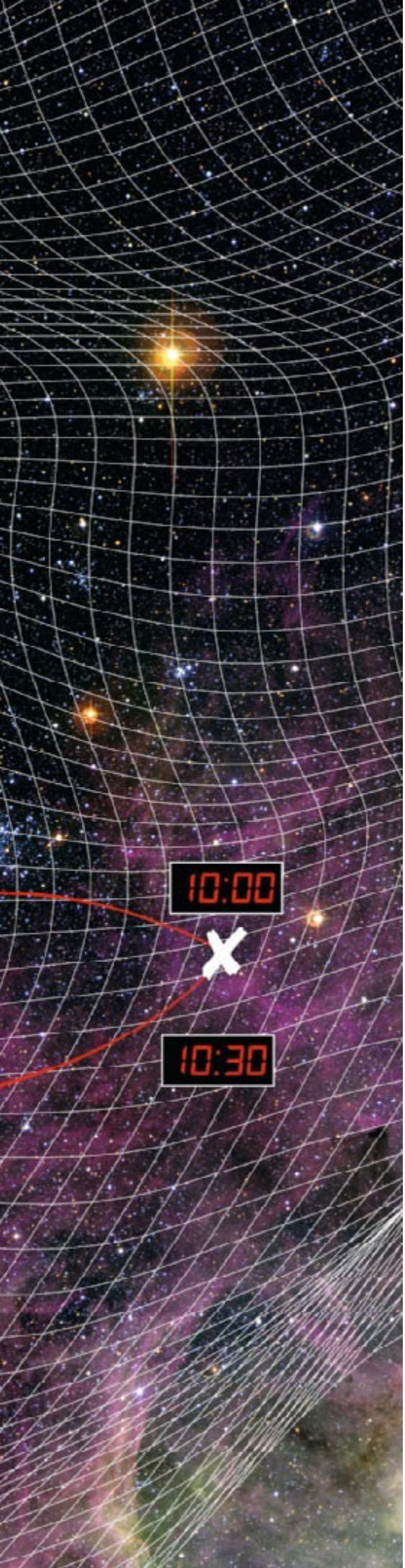
Physique théorique

La disparition du TEMPS en relativité

Marc Lachièze-Rey



LES DURÉES MESURÉES par des observateurs qui ne suivent pas la même trajectoire de l'espace-temps sont différentes : les durées absolues n'existent pas.



© Shutterstock/Bella D. ESO

Chacun de nous a une perception personnelle du temps, mais nous considérons qu'elle reflète, certes imparfaitement, un temps « universel », qui serait le même pour tous et en tout lieu, et s'écoulerait indépendamment de tout événement. Cette façon de voir fonctionne bien au quotidien : nous réussissons à honorer nos rendez-vous à une date convenue et, même si le temps nous paraît parfois « long » ou « trop court », nous sommes convaincus qu'il est possible d'accorder une durée objective à chaque phénomène.

Cela n'a pourtant rien d'une évidence. Le concept de temps universel est en accord avec la physique newtonienne, dont il constitue l'un des fondements. En introduisant le temps dans la physique – introduction qui n'avait rien de naturel ! –, Newton a permis le développement d'une science qui a volé de succès en succès pendant trois siècles. Mais le cadre de la physique newtonienne est désormais dépassé. Il a été remplacé par deux corpus distincts, la théorie de la relativité générale d'Einstein et la physique quantique, qui expliquent à elles deux une immense gamme de phénomènes physiques. Ces développements ont remis en question la conception classique du temps. En particulier, la relativité condamne l'idée newtonienne du temps universel et absolu. Et pour aller plus loin encore, il faudra sans doute se passer de la notion même de temps. Nous allons voir pourquoi.

On peut considérer que la physique moderne est née avec la publication des *Principia Mathematica* par Newton en 1687. Parmi ses innovations fondamentales, Newton postule l'existence objective d'un temps universel. Ce temps serait indépendant de nous et de tout système physique particulier. À notre échelle, il se manifeste par des propriétés en apparence évidentes : la possibilité d'attribuer une date à un événement, de mesurer une durée entre deux événements, ou de dire si un événement s'est déroulé avant un autre, etc. De façon moins intuitive, le tic-tac des horloges, le balancement des pendules et, *in fine*, tous les mouvements sont des manifestations du temps universel. Cette conception a longtemps parfaitement fonctionné et reste toujours valable pour la plupart des phénomènes familiers que l'on étudie au laboratoire.

Mais au cours du XIXe siècle, diverses expériences, et notamment celle de Michelson et Morley, ont convaincu les physiciens que la vitesse de la lumière dans le vide est invariante. En particulier, la vitesse de la lumière ne s'ajoute ni ne se retranche à celle de sa source si celle-ci est en mouvement. Autrement dit, la lumière n'obéit pas à la loi d'additivité des vitesses de la cinématique newtonienne (héritée de Galilée). Or la cinématique est l'étude des mouvements de la matière libre de toute interaction, et qui ne dépendent donc que des propriétés de l'espace et du temps. L'invariance de la vitesse de la lumière entraînait donc une remise en cause des notions newtoniennes de temps et d'espace absolus, ce qu'Einstein fut le premier à reconnaître pleinement.

La théorie de la relativité d'Einstein remet en cause les propriétés usuelles du temps. Il n'est plus possible de considérer le temps comme une entité universelle et indépendante.

Einstein montra tout d'abord qu'en raison de la vitesse finie de l'information (au maximum égale à celle de la lumière), la simultanéité absolue est impossible. Ce furent les prémisses de la théorie de la relativité restreinte, publiée en 1905. Cette théorie énonce que le cadre correct pour décrire les phénomènes physiques est l'espace-temps, et non plus l'espace seul. On peut découper comme on le souhaite dans ce continuum d'espace-temps des coordonnées de natures spatiales et temporelles, formant un référentiel. Mais chaque observateur possède son propre référentiel, différent de celui des autres.

La théorie stipule que les lois de la physique prennent des formes identiques dans tous les référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres, et indique comment, d'un point de vue mathématique, passer d'un référentiel à un autre.

La relativité restreinte fut reformulée quelques années plus tard par Henri Poincaré et Hermann Minkowski, lequel

L'ESSENTIEL

✔ **Le temps universel, qui s'écoule indépendamment des événements et de la même façon pour tous, est une invention de Newton.**

✔ **Ses propriétés, et donc son existence même, sont remises en cause par les théories de la relativité restreinte et générale.**

✔ **Cette disparition du temps, confirmée par l'expérience, se révèle incontournable dans les tentatives pour établir une théorie physique plus fondamentale.**

déclara lors de son introduction à la 80e assemblée des physiciens allemands en 1908 : « L'espace en lui-même, le temps en lui-même, sont condamnés à s'évanouir telles de simples ombres, et seule une sorte d'union des deux préserve une réalité indépendante. »

La théorie de la relativité générale, développée par Einstein dans les années qui suivirent, étend les principes de la relativité restreinte à des changements de référentiels plus généraux (en accélération les uns par rapport aux autres). L'espace-temps y devient une structure plus complexe, dotée d'une courbure. Cette courbure, qui s'identifie avec la gravitation, est créée par le contenu en matière et énergie de l'Univers.

La théorie de la disparition du temps

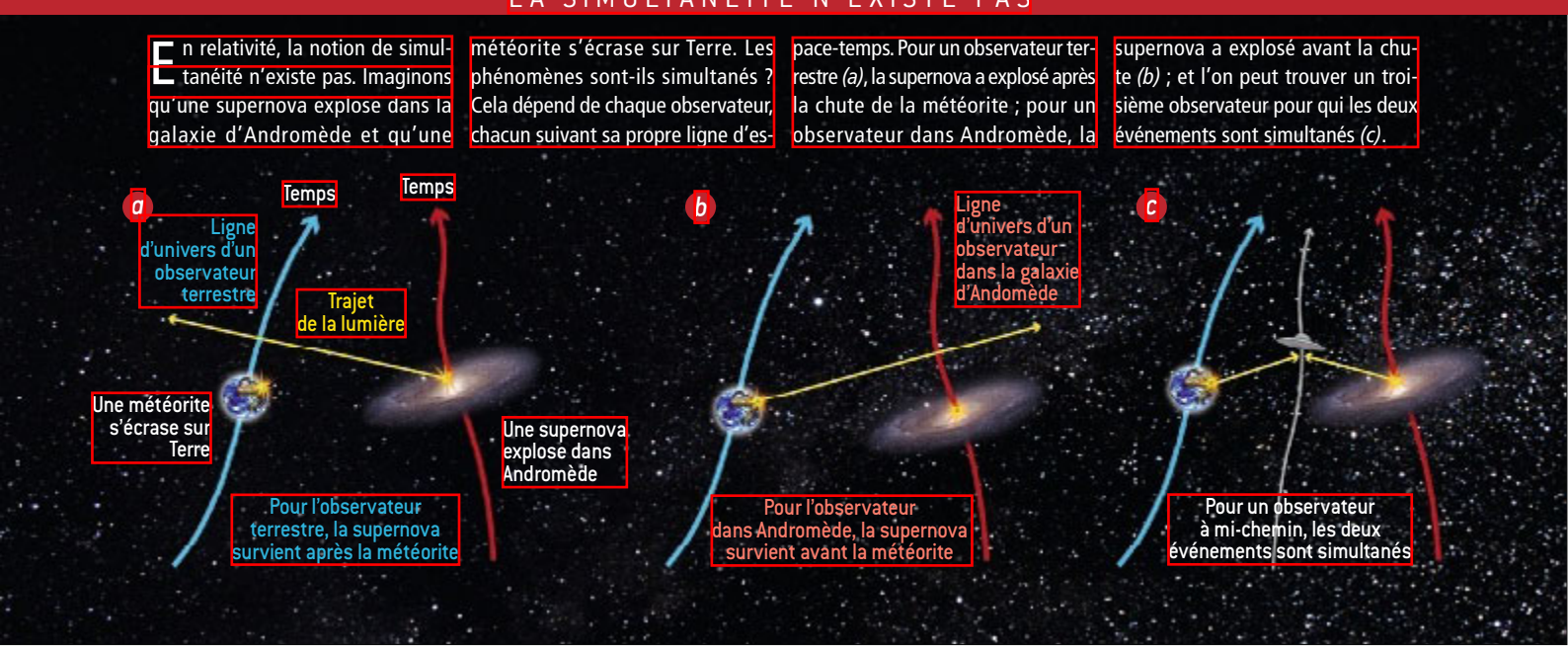
La relativité restreinte exprime la disparition du temps, disparition encore plus radicale en relativité générale. Cette idée suscite parfois des réticences, parce qu'au quotidien, nous continuons à utiliser sans problème nos montres et autres manifestations du temps universel. Et un examen superficiel des principes des équations de la relativité restreinte laisse croire qu'elles sont compatibles avec l'existence d'un temps. On parle ainsi fréquemment de « dilatation des durées » ou du temps qui « s'écoule plus ou moins vite ». Mais en réalité, c'est bien la disparition du temps qui est à l'œuvre. Voyons en quoi.

Tous les auteurs ont déclaré leur impuissance à définir ce qu'est le temps. Mais faute de le définir, on peut au moins énoncer les propriétés qui le caractérisent : durée et chronologie, déjà évoquées, mais aussi simultanéité et causalité, pour les principales. En montrant que ces propriétés ne sont pas vérifiées dans la nature, on pourra en conclure que le temps, tel qu'on le qualifie, n'existe pas.

Tout d'abord, l'existence du temps universel permet d'attribuer sans ambiguïté une date à chaque événement. On peut voir chaque événement comme un point de l'espace-temps, auquel on peut assigner sans ambiguïté une date, identique pour tous les observateurs. Ensuite, il est possible d'assigner une durée bien définie à tout phénomène physique. C'est simplement la différence entre la date de la fin et la date du début du phénomène. Une troisième propriété du temps universel est la simultanéité. Il est toujours possible de décider si deux événements se sont déroulés en même temps ou non ; il suffit pour cela de vérifier si leurs dates coïncident. De même, en comparant leur date, on peut dresser une chronologie, c'est-à-dire déterminer si un événement s'est déroulé avant ou après un autre. La dernière propriété qui nous intéresse ici

LA SIMULTANÉITÉ N'EXISTE PAS

En relativité, la notion de simultanéité n'existe pas. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? Cela dépend de chaque observateur, chacun suivant sa propre ligne d'espace-temps. Pour un observateur terrestre *(a)*, la supernova a explosé après la chute de la météorite ; pour un observateur dans Andromède, la supernova a explosé avant la chute *(b)* ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés *(c)*.



© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

est la causalité : on peut influer sur certains événements – ceux du futur causal – mais pas sur d'autres – ceux du passé causal. En physique newtonienne, la causalité se confond avec la chronologie.

À chacun sa durée

Or la relativité restreinte – et *a fortiori* la relativité générale – remet en cause toutes ces propriétés. Il est par exemple impossible d'assigner une durée bien définie à un processus physique. Imaginons le trajet d'un photon, de son émission par une étoile à sa réception par un télescope au sol. Bien que l'universalité de la méthode de mesure elle-même pose problème, supposons qu'il existe un tel protocole. Un premier observateur, sur Terre, l'applique et mesure une « durée » t_1. Un autre, situé sur le trajet, effectue une observation identique, et trouve une durée t_2, tandis qu'un troisième, se déplaçant le long du trajet, mesure une durée t_3. La physique newtonienne considère que t_1, t_2 et t_3 sont trois mesures d'une même grandeur, la durée : elles doivent donc être égales.

Mais de nombreuses observations (cascades de particules engendrées par les rayons cosmiques, désintégration dans les accélérateurs de particules, phénomènes astrophysiques à haute énergie, ainsi que des expériences en laboratoire ou en orbite, etc.) prouvent que ce n'est pas le cas : en général, les valeurs mesurées par différents observateurs ne sont pas les mêmes, écarts que prédisent avec exactitude les théories relativistes.

La seule explication cohérente est que ces mesures concernent en fait des grandeurs différentes ; autrement dit, il n'existe pas de grandeur que l'on pourrait appeler sans ambiguïté « durée » d'un phénomène. Toute autre interprétation cherchant à relier les différentes « durées » mesurées à une durée intrinsèque conduit à des paradoxes.

Il existe pourtant une durée en un sens « plus valable » que les autres. Les équations de la relativité indiquent que dans notre exemple, plus le trajet d'un observateur est proche de celui du photon émis par l'étoile, plus la « durée » qu'il va mesurer est petite. De façon générale, l'observateur qui est lié à un processus et l'accompagne du début à la fin mesurera la durée la plus petite possible. Nommée « durée propre », on peut considérer que c'est la « vraie » durée du processus.

Dans notre exemple, la durée propre du phénomène est celle que mesurerait le photon. Or la relativité indique que la durée propre d'un photon est... nulle. Cela n'est qu'une manifestation du fait qu'il voyage à la vitesse limite, celle de la lumière ; de façon générale, c'est vrai pour toute particule de masse nulle. Ainsi, la durée propre du trajet d'un photon, de son émission dans une galaxie lointaine à sa réception, est nulle. On aurait pourtant envie de dire que le trajet dure des milliards d'années !

Dès lors, comment différents observateurs peuvent-ils comparer les durées entre deux événements donnés ? Chaque observateur ne peut mesurer que sa durée propre, le long de sa trajectoire dans

Les durées dépendent de l'observateur

La notion de durée d'un phénomène est différente d'un observateur à l'autre. Imaginons par exemple un train en mouvement uniforme, qui passe devant une gare. Une impulsion lumineuse est envoyée du sol vers le plafond du train, où elle est réfléchie par un miroir vers son point de départ.

Pour un observateur assis dans le train, la durée du trajet de la lumière est $d = 2\,h/c$, où h est la hauteur du plafond et c la vitesse de la lumière. Mais pour un observateur sur le quai de la gare, puisque le train a avancé pendant le trajet de la lumière, le point de réflexion de la lumière au plafond, et encore plus le point d'impact au retour sur le plancher, sont décalés par rapport à la verticale du point d'émission.

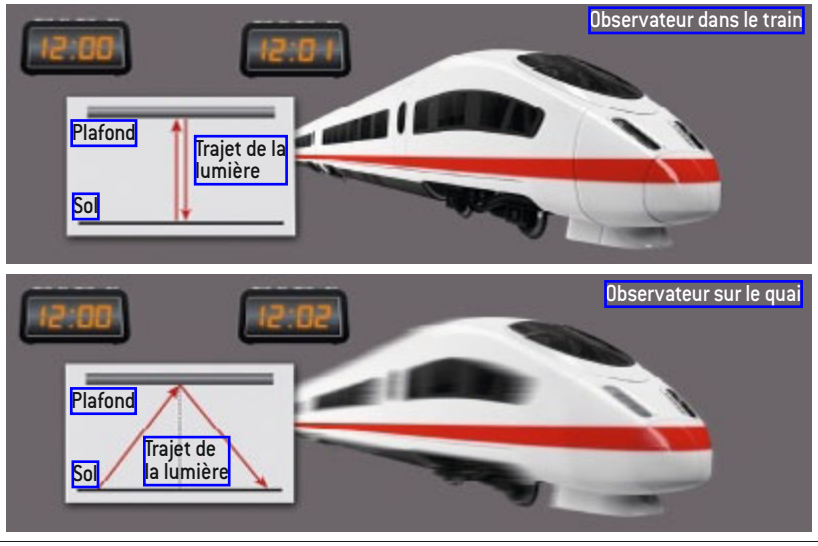
Comme ce point de retour ne se trouve pas là où se situe l'observateur de la gare, celui-ci ne peut mesurer directement la durée du phénomène (on dit que cet événement n'appartient pas à sa « ligne d'univers », qu'il décrit dans l'espace-temps.) Il peut cependant reconstituer ce qu'il qualifiera – de façon impropre, au sens strict – de durée du phénomène.

La vitesse de la lumière étant invariante, l'aller-retour de la lumière dure ainsi plus longtemps observé depuis la gare. Un calcul géométrique simple montre que la « durée » observée depuis le quai est :

$$d' = d/\sqrt{(1 - v^2/c^2)},$$

où v est la vitesse du train. Le « temps » du train et le temps de la gare ne sont donc pas identiques.

Cependant, pour avoir une compréhension correcte de la situation, il faudrait comparer les durées de phénomènes se situant sur la trajectoire des différents observateurs dans l'espace-temps. C'est tout l'objet du « paradoxe des jumeaux » (*voir l'encadré page suivante*).



© Shutterstock/fcmcg

Pour la Science

l'espace-temps (sa ligne d'univers). Or, entre les deux phénomènes, ces trajectoires diffèrent en général. Le « paradoxe des jumeaux », proposé par le physicien Paul Langevin, en est une illustration *(voir l'encadré ci-dessous)*.

En résumé, il n'existe pas de moyen objectif de définir une durée entre deux événements. On peut définir une durée propre, mais celle-ci n'a rien à voir avec ce que peut mesurer un observateur ; ni avec ce que nous appelons intuitivement durée.

Pour évoquer cette situation, on parle fréquemment de « dilatation des durées » selon les observateurs. C'est un abus de langage. En réalité, il existe seulement différentes mesures, qui concernent des grandeurs distinctes, et il n'y a pas grand sens à les comparer. De même, l'idée que la « vitesse d'écoulement du temps » varierait selon les observateurs n'a pas de sens. Cela suggérerait qu'il y a un temps universel et absolu qui s'écoulerait plus ou moins vite en fonction du contexte. En réalité, il existe simplement différents temps, propres à chaque observateur.

L'absence de durée implique celle de temps absolu. En effet, dans le cas contraire, il suffirait de soustraire la date de fin et de début du phénomène pour mesurer sa durée, comme nous l'avons vu.

Durées et trajectoires dans l'espace-temps

Le « paradoxe » des jumeaux, inventé par le physicien Paul Langevin, est l'une des illustrations les plus connues des implications de la relativité sur les notions temporelles.

Deux jumeaux fêtent leur 20e anniversaire commun. Peu après, l'un part pour un long voyage dans l'espace. Après son retour, ils fêtent un nouvel anniversaire, mais le jumeau resté sur Terre a alors 40 ans, tandis que voyageur n'en a que 30 ! Comment est-ce possible ?

En fait, la situation des deux jumeaux n'est pas symétrique. Entre le point de départ et le point d'arrivée, les deux jumeaux suivent des trajectoires (ou lignes d'univers) différentes dans l'espace-temps *(voir le diagramme ci-dessous)*. La géométrie de l'espace-temps permet de calculer leur « longueur », qui correspond à la durée propre du phénomène pour celui qui suit cette ligne.

Sur la figure, la trajectoire suivie par le voyageur semble plus longue. Mais dans l'espace-temps relativiste, les longueurs ne se comportent pas comme dans l'espace euclidien ordinaire : la géométrie de Minkowski introduit un signe moins entre les coordonnées spatiales et temporelles, ce qui rend le trajet du voyageur plus court, dans cette métrique, que le trajet du jumeau resté sur Terre.

On peut aussi raisonner en termes de géodésiques. Les géodésiques sont les trajectoires que suit un corps en l'absence de toute accélération. Dans le plan euclidien, les géodésiques sont les droites, de longueur minimale. Mais dans la géométrie relativiste, les géodésiques sont les trajectoires qui maximisent le temps propre.

Or le jumeau resté sur Terre, au repos, suit une géodésique, tandis que le voyageur suit une trajectoire en partie accélérée, qui n'est plus une géodésique. La durée propre mesurée par ce dernier est donc plus petite. Dans le cas limite où le voyageur se déplacerait à la vitesse de la lumière, la durée propre de son voyage serait égale à zéro.

Remarquons que le temps du voyageur ne s'écoule pas plus vite que sur Terre, ou inversement. Les années sont les mêmes pour les deux jumeaux, et les processus biologiques se déroulent au même rythme. C'est comme si vous alliez de Paris à Marseille en passant par Toulouse : vous aurez parcouru plus de kilomètres que par le trajet direct, mais ces kilomètres sont les mêmes. Ici, les deux jumeaux suivent simplement des trajectoires de l'espace-temps qui ont des « longueurs » ou, de façon équivalente, des durées propres, différentes.

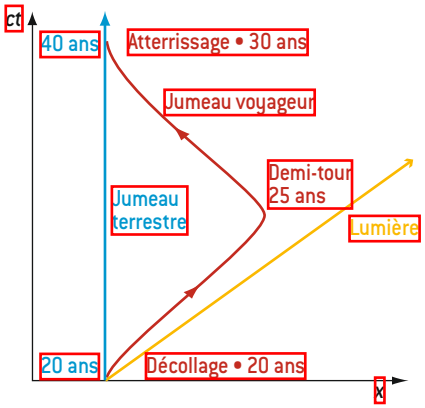


DIAGRAMME D'ESPACE-TEMPS. Dans le référentiel inertiel de la Terre *(où, par commodité, ne figure qu'une seule coordonnée spatiale)*, on a représenté le trajet des jumeaux dans l'espace-temps. La ligne d'univers du frère resté sur Terre *(en bleu)* est une géodésique. Son jumeau décolle de la Terre et s'éloigne à grande vitesse, fait demi-tour et revient *(courbe rouge)*. De façon contre-intuitive, dans la géométrie de l'espace-temps relativiste, la courbe rouge est plus « courte », en terme de durée propre, que la bleue. La ligne jaune représente la ligne d'univers d'un signal lumineux émis au départ ; elle est de « longueur » nulle.

Chacun son ordre

Les notions de simultanéité et de chronologie ne résistent pas plus à l'analyse dans le cadre relativiste. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? L'un s'est-il déroulé avant l'autre ? Réponse possible : un observateur terrestre voit la météorite tomber avant l'explosion ; un observateur dans Andromède voit la supernova exploser avant la chute ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés *(voir l'encadré page 46)*. Du fait de la vitesse finie de l'information, chaque observateur voit les événements survenir à différents moments en fonction de sa position et de sa vitesse par rapport à eux. L'ordre dans lequel l'un voit des événements contredira l'ordre de l'autre. La chronologie et a *fortiori* la simultanéité sont relatives. Cela est manifestement incompatible avec l'existence du temps universel, car dans ce cas, il suffirait de comparer les dates des événements pour savoir lequel précède l'autre ou s'ils sont simultanés.

La causalité, en revanche, reste un concept parfaitement défini en relativité, même si elle n'est plus équivalente à la chronologie. En physique classique, deux situations sont possibles : soit l'événement A influence l'événement B, qui est alors dans le futur causal de A ; soit au contraire A peut avoir été influencé par B, auquel cas B est dans le passé causal

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

de A. La causalité distingue le passé et le futur. Dans le cadre de la théorie de la relativité, il existe un troisième cas : l'événement A ne peut influencer l'événement B ni inversement.

Une fois encore, c'est dû à la vitesse finie de l'information. Par exemple, une explosion survenue à la surface du Soleil « il y a trois minutes » dans un référentiel qui m'est associé ne peut avoir d'impact sur un événement se déroulant au moment présent sur Terre, car la lumière met au minimum huit minutes pour nous parvenir. Inversement, ce qui se passe sur Terre au moment présent ne peut influer sur l'explosion à la surface du Soleil. Les deux événements sont « non causalement liés ». En termes mathématiques, la relation de causalité relativiste est une relation d'ordre partielle, et non plus totale comme en physique newtonienne.

Le temps universel n'existe donc pas. Au quotidien, cela reste cependant une approximation utile. Deux horloges marquent chacune l'écoulement de leur temps propre. Mais si elles sont voisines et au repos l'une par rapport à l'autre, ces deux grandeurs sont très proches, et l'on peut les confondre (la proximité et le repos dépendant de la précision considérée). Deux observateurs assez proches peuvent considérer qu'un même temps s'écoule pour eux. De fait, nous et nos horloges occupons un minuscule coin de l'Univers, et nous sommes tous au repos les uns par rapport aux autres en comparaison des distances cosmiques et de la vitesse de la lumière. En pratique, il est légitime de considérer que nous partageons un temps propre commun ; ce qui revient à dire que, dans notre environnement et pour des vitesses assez petites par rapport à celle de la lumière, on peut appliquer la physique newtonienne. C'est ce temps propre commun que Newton a qualifié d'universel. Mais c'est un choix arbitraire et valable localement.

Tant qu'elle n'a pas eu affaire à des vitesses très élevées et que la précision des mesures temporelles est restée limitée, la physique a pu s'accommoder du temps universel. À l'époque de Newton, aucune

L'AUTEUR

Marc LACHIÈZE-REY est directeur de recherche au Laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS-Université Paris 7-Denis Diderot)

observation ne pouvait indiquer que ce temps n'en était pas vraiment un. Mais les progrès des mesures physiques et le changement d'échelle des systèmes étudiés rendent cette approximation intenable.

Les durées de vie propres des particules voyageant à des vitesses proches de celle de la lumière dans les accélérateurs ou dans le rayonnement cosmique sont par exemple beaucoup plus courtes que les durées que nous observons. Dans l'environnement terrestre proche, les horloges atomiques les plus précises, séparées de quelques mètres seulement, n'indiquent pas le même temps ! Le temps propre d'un cosmonaute ou d'un satellite en orbite autour de la Terre est différent du nôtre (le cosmonaute « vieillit moins vite »).

IL Y A TOUTES LES RAISONS DE PENSER
que la disparition du temps est fondamentale et doit être prise en compte dans une approche plus large de la physique.

Mais tant que l'on ne s'éloigne pas trop de la Terre, on peut encore considérer le temps des objets en orbite comme une petite déviation de notre temps propre. Des « corrections relativistes » sont ainsi indispensables au système GPS de géolocalisation , qui ne fonctionnerait pas dans un cadre purement newtonien.

La relativité impose donc la disparition de la notion de temps. Cela étant, de nombreuses raisons nous laissent penser que la physique actuelle n'est pas aboutie et qu'il doit exister une théorie plus fondamentale intégrant la relativité et la physique quantique. Les physiciens se heurtent cependant à une difficulté de taille pour construire cette théorie de la « gravitation quantique » : la physique quantique est construite sur la notion de temps universel, dont la relativité générale nie l'existence.

Il existe néanmoins une reformulation de la physique quantique qui élimine la notion de temps ; c'est une voie prometteuse *(voir l'article de Carlo Rovelli)*. L'idée est de considérer les mesures temporelles d'un événement non pas comme une référence à un temps, mais comme la comparaison avec un autre processus, considéré comme une horloge. Par exemple, se lever à sept heures en regardant son réveil revient à constater une corrélation entre l'événement « se lever » et l'événement « mon réveil indique sept heures ». On peut ensuite corréler les indications du réveil à celles d'une horloge atomique, à la rotation de la Terre ou à tout autre système physique. Aucune référence au temps n'est nécessaire dans ces corrélations. Cette reformulation « relationnelle », qui rejette l'usage du temps, évite toute ambiguïté. Elle s'accorde avec les notions de durées propres, personnelles à chaque observateur et valables uniquement dans son environnement. Mais déjà, elle suggère que la notion de temps n'est pas aussi fondamentale qu'il pourrait sembler.

À un niveau plus fondamental, selon la théorie de la relativité, la durée propre d'un processus physique découle de certaines propriétés de l'espace-temps ; et plus précisément de ce qu'on appelle sa métrique, c'est-à-dire la façon dont les distances sont définies dans l'espace-temps. Autrement dit, la durée propre qu'un système physique perçoit, et peut mesurer, peut être vue comme le résultat d'une interaction avec la métrique de l'espace-temps dans lequel il évolue.

Vers la disparition de la métrique

Ce dernier bastion à caractère temporel pourrait lui aussi être remis en question. En effet, les approches de gravité quantique évoquées – « gravité quantique à boucles », « écumes de spin » et autres théories apparentées – impliquent non seulement l'absence de temps, mais aussi de toute structure d'espace-temps préalable, ou au moins d'une métrique. La métrique n'est pas considérée comme existant *a priori*, mais comme une conséquence attendue de la théorie. On parle de *background independance*, qu'on pourrait traduire par « indépendance par rapport au cadre ». L'absence de métrique entraîne celles des durées propres qui en découlent, ainsi que de la causalité. La disparition du temps est une chose, bien établie aujourd'hui, mais celle de ces notions plus fondamentales en est une autre...

Toutes ces réflexions sont loin d'être achevées et font l'objet de recherches actives. Mais il est incontestable que la relativité a définitivement condamné la plupart des propriétés du temps et des notions qui s'y rapportent. Il y a toutes les raisons de penser que cette disparition est fondamentale, et doit être prise en compte dans une approche plus large de la physique. ■

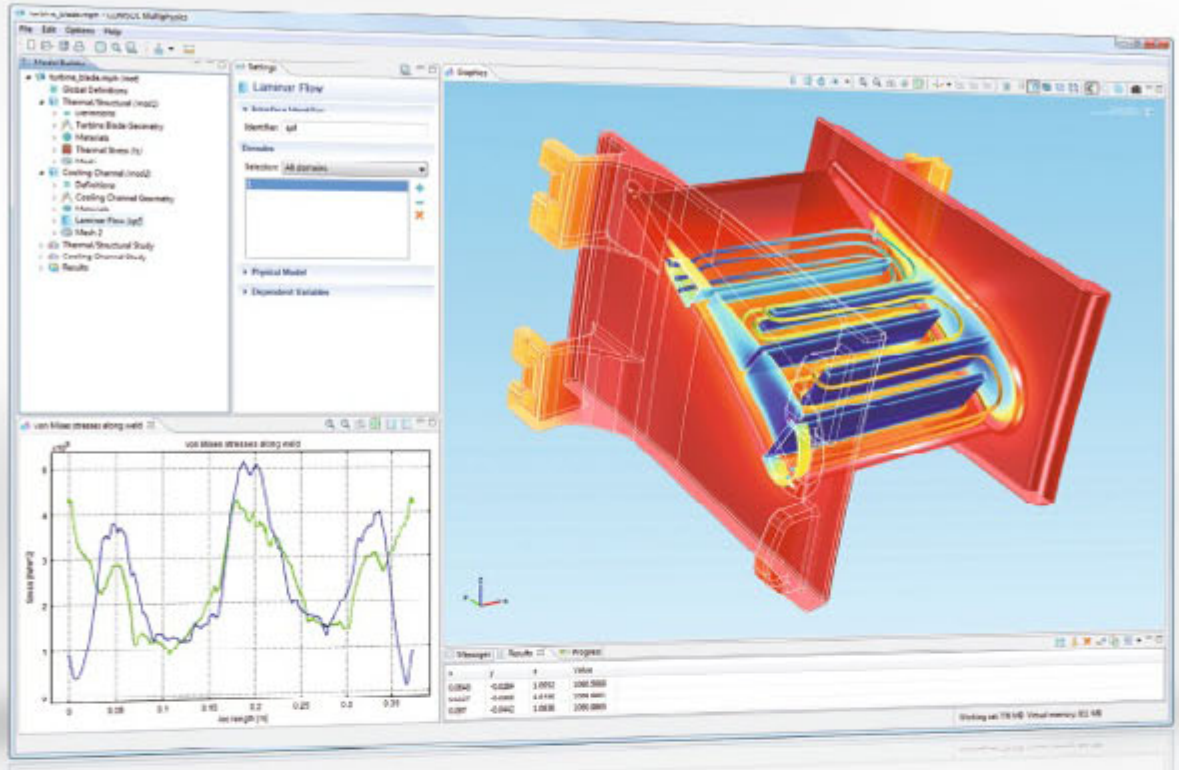
BIBLIOGRAPHIE

M. Lachièze-Rey, **Au-delà de l'espace et du temps : La nouvelle physique**, Le Pommier, 2003.

S. Bergia, **Einstein, le père du temps moderne**, *Les Génies de la Science*, n° 11, 2002.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

COMSOL MULTIPHYSICS®



Refroidissement d'une pale d'un stator de turbine, avec la distribution des contraintes de von Mises le long des soudures.

80% des concepts produits n'arrivent jamais sur le marché. Donnez vie à vos idées avec COMSOL Multiphysics®!

Les simulations multiphysiques reproduisent avec précision les caractéristiques essentielles de vos designs. Comment ? En prenant en compte tous les effets physiques du monde réel. L'approche COMSOL Multiphysics® donne des résultats - des résultats concrets qui économisent du temps de développement et stimulent l'innovation.

Capture the Concept.®

Exemples d'applications sur:

www.comsol.com/multiphysics

© 2010 COMSOL INC. COMSOL, COMSOL MULTIPHYSICS ARE REGISTERED TRADEMARKS OF COMSOL AB. CAPTURE THE CONCEPT IS A TRADEMARK OF COMSOL AB. OTHER PRODUCT OR BRAND NAMES ARE TRADEMARKS OR REGISTERED TRADEMARKS OF THEIR RESPECTIVE HOLDERS.

COMSOL

S'affranchir du temps

Carlo Rovelli

La notion de temps pose certaines difficultés à la physique moderne. Une issue à ce problème consiste à se passer de structure temporelle dans les théories fondamentales. Des physiciens ont montré que c'est possible.

La notion intuitive de temps nous paraît simple. En réalité, elle a de nombreuses caractéristiques qui la rendent complexe et structurée. Premièrement, le temps a une structure linéaire : il est comme une droite dont chaque point représente un instant. Deuxièmement, cette droite est orientée, le passé étant différent du futur. Troisièmement, cette droite contient un instant très particulier, le « présent », qui sépare le passé du futur et qui, en un sens, est le seul qui soit réel. Quatrièmement, le temps est mesurable, par exemple en jours et heures. Cinquièmement, le temps est universel, le même pour tous. Enfin, le temps passe même quand rien ne bouge : il a sa propre réalité, indépendante de la complexité des événements qui se succèdent. On peut donner de toutes ces propriétés une image un peu naïve en considérant le temps de l'Univers comme le battement imposé par une Grande horloge cosmique.

Mais les progrès de la science montrent que le monde est souvent bien différent de ce qu'il nous paraît. Des notions « évidentes » comme le caractère plat et l'immobi-

L'ESSENTIEL

- ✔ **Il est possible de formuler la mécanique newtonienne, la mécanique quantique et la relativité générale sans utiliser de paramètre temporel.**
- ✔ **Cela résout certains problèmes conceptuels posés par le temps. Mais il faut alors expliquer d'où provient notre intuition du temps.**
- ✔ **Une réponse possible est donnée par le « temps thermique », un sens d'évolution associé aux systèmes macroscopiques dont l'état microscopique est décrit de façon probabiliste.**

© ShutterstockFreeSoulProduction. Pour la Science

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

1. LA DIFFICULTÉ À ÉDIFIER UNE THÉORIE quantique de la gravitation, qui unirait la physique quantique et la relativité générale d'Einstein, conduit une partie des physiciens à mettre en doute la réalité du temps. De fait, il est possible de formuler les théories fondamentales sans utiliser de paramètre temporel. Mais il reste à expliquer comment se construit le temps, c'est-à-dire comment il vient s'imposer à notre intuition.

lité de la Terre n'ont été valides et utiles qu'un temps dans l'histoire. Or la même chose se produit avec la notion de temps. Par exemple, nous savons aujourd'hui que le temps n'est pas universel. La durée d'un événement semble en général la même pour différentes personnes, mais l'unique raison de cette belle concordance est que nos montres sont très peu précises. Les horloges atomiques ont permis de vérifier, conformément à la théorie de la relativité d'Einstein, que le temps qu'elles indiquent dépend de leurs vitesses, de leurs altitudes et d'autres facteurs. Et avec les progrès de la physique, d'autres caractéristiques du temps intuitif ont perdu leur pertinence *(voir les articles de Craig Callender et de Marc Lachièze-Rey)*.

La révision des notions fondamentales de la physique, et en particulier celle de temps, ne s'est pas interrompue avec la théorie de la relativité d'Einstein. Elle se poursuit aujourd'hui, et c'est ce que nous allons détailler.

Le statut du temps est à revoir

Commençons par une petite leçon que nous a donnée l'histoire. Il y a plus d'un siècle, Einstein a pu prédire que le temps ne s'écoule pas au même rythme pour tous les observateurs. Comment y est-il parvenu ? Il disposait à son époque de la mécanique de Newton et Galilée, de l'électromagnétisme de Faraday et Maxwell, et de la théorie newtonienne de la gravitation. D'un côté, ces théories étaient très efficaces, et donc crédibles ; mais de l'autre, elles étaient fondées sur des notions en contradiction apparente (par exemple : invariance de la vitesse de la lumière en électromagnétisme *versus* addition des vitesses relatives en mécanique newtonienne). Einstein a compris qu'il fallait trouver de nouveaux schémas conceptuels où les résultats de ces théories pouvaient être réunis de façon non contradictoire, et que pour ce faire, il fallait revoir certaines notions fondamentales, notamment celle de temps.

Nous nous retrouvons aujourd'hui dans une situation similaire. Nous disposons de deux théories qui se sont montrées très efficaces, et donc crédibles, tout au long du dernier siècle : la mécanique quantique et la relativité générale d'Einstein. Mais, une fois encore, ces théories sont fondées sur des notions qui apparaissent en conflit, et il semble nécessaire de

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

L'AUTEUR

Carlo ROVELLI est professeur à l'Université de la Méditerranée et travaille au Centre de physique théorique de Luminy (CNRS), près de Marseille.

revoir notre notion de temps pour construire un schéma conceptuel cohérent.

La physique quantique et la relativité générale, prises ensemble, indiquent que pratiquement tous les aspects de la notion naïve de temps ne sont que des propriétés locales et partielles de la temporalité, qui dépendent des limites de nos sens et des particularités de notre expérience.

Comment est-on parvenu à cette conclusion ? Oublions un instant la mécanique quantique. Le succès de la théorie de la relativité nous a appris que le temps est indissociable d'un continuum nommé espace-temps, et que cet espace-temps est une entité dynamique, qui bouge : c'est comme un immense mollusque mobile au sein duquel nous sommes immergés, pour

« LA MEILLEURE OPTION EST D'ABANDONNER la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique. »

utiliser une métaphore chère à Einstein. Cette étape réduit déjà le temps à quelque chose de très différent de la notion intuitive que l'on en a. Maintenant, si nous prenons en compte la mécanique quantique, cette dernière révèle que toute entité dynamique, par exemple le champ électromagnétique, est en réalité bien plus complexe qu'un continuum mobile : ses manifestations peuvent seulement être décrites en termes de lois de probabilités. Il s'ensuit que le temps, qui n'était déjà plus universel comme l'a montré la relativité, n'est plus orienté et perd même sa structure linéaire...

Je suis ainsi convaincu que, pour conceptualiser la temporalité, le devenir et l'évolution d'une façon qui soit compatible tant avec la mécanique quantique qu'avec la relativité générale, c'est-à-dire qui puisse fonder une théorie quantique de la gravitation, la meilleure option est d'abandonner la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique, ou comme nous avons abandonné le caractère absolu de la simultanéité dans la théorie de la relativité restreinte.

S'affranchir entièrement de la notion de temps est une option moins radicale qu'il n'y paraît. Tout bien réfléchi, le temps n'est pas si essentiel en physique. Ce que nous mesurons en réalité n'est jamais le temps, mais toujours quelque variable physique qui change « avec le temps ». Par exemple, nous mesurons le « temps » en observant la position des aiguilles de notre montre ; mais pourquoi ces aiguilles nous donnent-elles le « vrai temps » ? Parce que leur lecture est la même que celle de l'horloge de la mairie ou de l'horloge diffusée sur le Web. Mais ces horloges nous indiquent-elles le « vrai temps » ?

La réponse à ces questions apparemment sans fin a été donnée par Newton dans une très belle page de sa grande œuvre, les *Principia*. En effet, notait Newton, nous ne mesurons jamais le temps t. Nous ne faisons qu'observer des grandeurs physiques A, B, C, etc. et constater qu'elles prennent à chaque fois des valeurs différentes. Les quantités observables nous apparaissent changer continuellement. Il est fort utile, remarquait Newton, de postuler l'existence d'une variable physique t qui n'est pas observable, mais qui serait comme l'occulte chef d'orchestre qui mène le ballet des grandeurs observables. Quand le paramètre t change, les variables physiques changent et leur modification est décrite par des fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc.

Toute la physique, proposait Newton, peut être exprimée en termes d'équations qui régissent ces fonctions de t. Nous n'observons jamais ces fonctions, parce que ce n'est pas la variable t que nous observons, mais seulement les quantités A, B, C, etc. et leur ballet. Autrement dit, nous observons comment A change avec B, C, etc., B avec A, C etc., C avec A, B, etc., et ainsi de suite. En d'autres termes, expérimentalement, nous n'avons accès qu'aux fonctions $A(B, C,...)$, $B(A, C,...)$, $C(A, B,...)$, etc. Mais d'un point de vue théorique, il se révèle plus facile d'accéder aux relations entre les grandeurs observables en déterminant les fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc. : il suffira alors d'exprimer t en fonction de l'une de ces grandeurs et ainsi de retrouver les relations entre A, B, C, etc.

Cette démarche un peu saugrenue, qui consiste à faire appel à un paramètre temporel t sous-jacent et inobservable, est à la base de la physique newtonienne et de ses avatars. Elle fonctionne très bien... jusqu'à ce qu'on essaie de construire une théorie quantique de la gravité. Le schéma newtonien du temps montre déjà ses limites en relativité générale, puisque par exemple les temps de systèmes différents ne sont généralement pas les mêmes *(voir l'article*

✔ BIBLIOGRAPHIE

C. Rovelli, **Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?**, Bernard Gilson Éditeur, 2006.

C. Rovelli, **Quantum Gravity**, Cambridge University Press, 2004.

✔ SUR LE WEB

C. Rovelli et M. Smerlak, **Thermal time and the Tolman-Ehrenfest effect : temperature as the « speed of time »**, 2010, disponible sur : http://fr.arxiv.org/abs/1005.2985

C. Rovelli, **Forget time**, 2008, essai disponible sur : http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Rovelli Time.pdf

C. Rovelli, **Gravité quantique : quand le temps et l'espace n'existent plus**, conférence donnée le 19 mars 2005, disponible sur : http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/04-05/conferences/01-05-einstein/03-rovelli/index.htm

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

de Marc Lachièze-Rey). Et quand, en plus, on tient compte de la mécanique quantique, où un même système physique peut être dans une superposition d'états différents, donc où plusieurs temps peuvent se superposer, c'est toute la conception newtonienne du temps qui s'effondre. Les variables physiques ne dansent plus au rythme unique d'une seule variable *t*, elles dansent de façon beaucoup plus sauvage.

Comment résoudre la difficulté ? La solution est simple dans son principe : en écrivant des équations pour les fonctions $A(B, C,...)$, $B(A, C,...)$, $C(A, B,...)$, etc. qui décrivent directement l'évolution des variables physiques les unes par rapport aux autres, au lieu de passer par l'hypothèse newtonienne de l'existence d'une unique variable *t* menant la danse. Au niveau de la gravité quantique, c'est-à-dire dans l'infiniment petit, au cœur des trous noirs ou dans un état de l'Univers proche du Big Bang, la nature ne ressemble pas à un défilé bien ordonné mené à la baguette par une variable *t*.

Une variable *t* absente

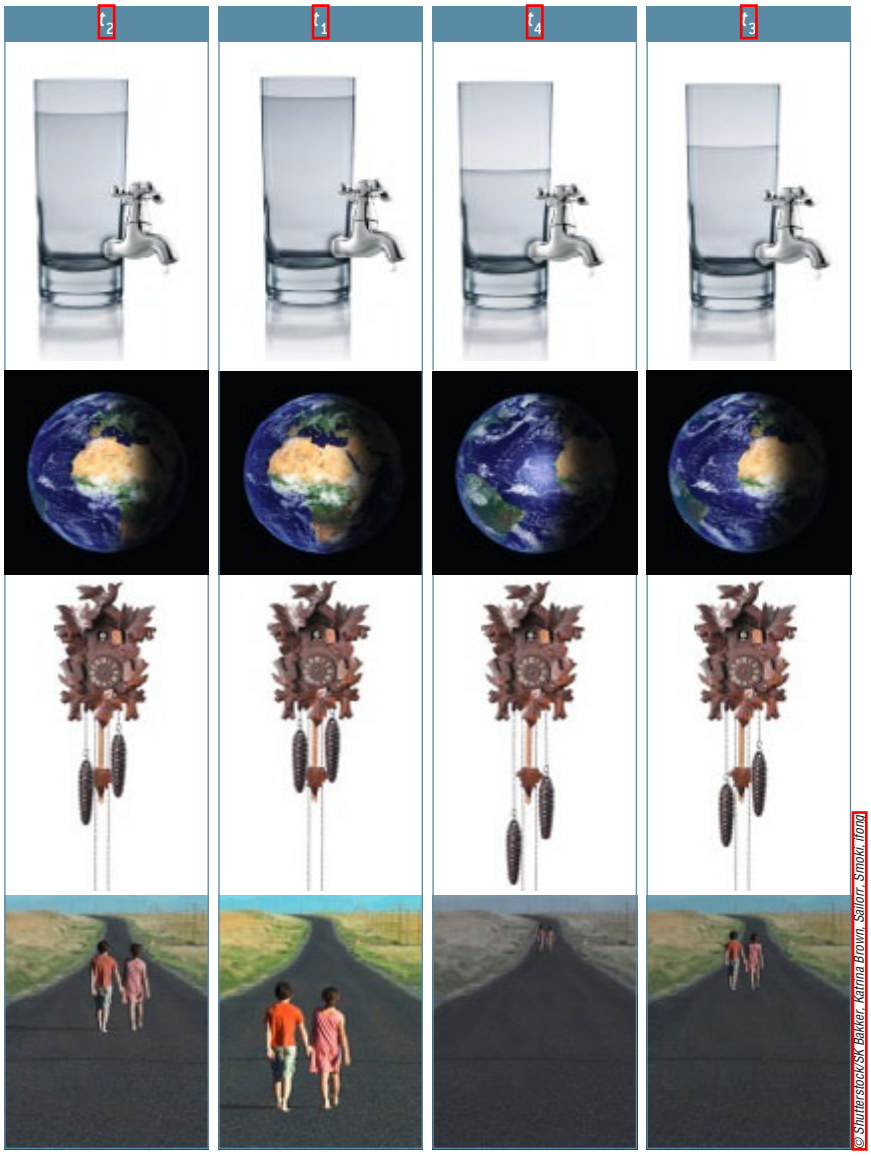
En fait, la possibilité de ne pas introduire une variable privilégiée *t* et de ne décrire que l'évolution relative des variables a toujours été présente. Comme je l'ai montré à partir des années 1970, on peut reformuler toute la mécanique newtonienne sans jamais utiliser de variable *t* ! C'est une possibilité dans le cadre limité de la physique newtonienne. Mais cela devient une nécessité dans le cadre bien plus large de la théorie quantique de la gravité : dans les équations de cette dernière, la variable *t* ne figure pas.

Historiquement, les choses se sont passées un peu dans le sens inverse. D'abord, une équation pour la gravité quantique a été obtenue à la fin des années 1960 par les Américains Bryce DeWitt et John Wheeler, qui ont appliqué les règles formelles de la mécanique quantique à la relativité générale. Le résultat était surprenant, car le temps *t* était absent de cette équation.

Petit à petit, nous avons fini par comprendre la signification physique de cette absence de la variable *t* : le postulat newtonien de l'existence d'une variable inobservable nommée « temps » n'est ni nécessaire ni possible quand on tient compte à la fois de la mécanique quantique et de la relativité générale. Et de fait, des formulations atemporelles de la mécanique quantique et de la relativité générale ont pu être élaborées au cours des deux dernières décennies. Aideront-elles les théoriciens à trouver une façon satisfaisante de marier ces deux édifices, c'est-à-dire à trouver une théorie quantique satisfaisante de la gravité ? Je l'espère.

Finalement, que signifie tout cela ? L'explication la plus directe est que l'idée d'un temps indépendant des événements qui s'y déroulent est fausse. Le temps, en soi, n'existe pas, il n'est qu'une tentative que nous avons faite pour mettre de l'ordre dans le ballet complexe du réel. Comme les couleurs, le temps n'existe que dans certains contextes, et il émerge de notre propre perspective, particulière et limitée, sur la réalité. Pour comprendre le monde dans un contexte plus vaste que celui de notre petit jardin, il faut oublier le temps.

Cependant, pour prendre au sérieux cette image d'un monde dépourvu de temps, un pas conceptuel reste à franchir. Si, au niveau fondamental, le monde peut être décrit sans référence à une notion de temps, en quoi consiste ce flux continu que nous percevons au quotidien, qui semble diriger nos vies et que nous appelons



© Shutterstock/SK Bekker, Karma Brown, Sailorr, Smoki, Hong

2. COMMENT S'AFFRANCHIR DU TEMPS ? Plutôt que de décrire tout phénomène en termes de grandeurs qui varient en fonction d'une variable temporelle *t*, l'idée est de relier les phénomènes entre eux, c'est-à-dire d'établir des relations entre les valeurs prises par les grandeurs observables associées aux phénomènes. De telles relations sont illustrées ici pour quatre grandeurs observables : le niveau d'eau dans un récipient qui fuit, l'angle de rotation de la Terre sur elle-même, la hauteur des poids d'un coucou, la distance parcourue en marchant le long d'une route. L'ordre temporel n'a ici pas été respecté, mais il suffit d'ordonner l'une des grandeurs pour que les autres le soient aussi.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

3. LES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES évoluent de façon irréversible, comme l'illustre ici la diffusion d'un colorant dans un verre d'eau. La notion intuitive que l'on a du temps serait issue du comportement de tels systèmes : c'est l'hypothèse du temps thermique. Les systèmes thermodynamiques sont des systèmes macroscopiques dont l'état microscopique n'est connu que de façon probabiliste. À un tel « état statistique », il est possible d'associer, en s'appuyant sur des travaux des mathématiciens japonais Minoru Tomita et Masamichi Takesaki, un « flot » qui peut être interprété comme une évolution temporelle et qui définit ainsi un temps.

« temps » ? S'il ne régit pas le monde au niveau fondamental, comment et dans quels contextes émerge-t-il ?

Une réponse possible à cette question consiste en l'idée de « temps thermique », proposée vers 1993 par le mathématicien français Alain Connes et moi-même. Essayons d'en expliquer l'essence. Dans la physique usuelle, on décrit l'évolution « dans le temps » de nombreux systèmes différents. Ces derniers peuvent être regroupés en deux classes différentes : les systèmes mécaniques et les systèmes thermiques. À la première classe appartiennent tous les phénomènes où la chaleur et la température ne jouent aucun rôle important (par exemple l'oscillation d'un pendule ou le mouvement des planètes). La seconde classe est celle des systèmes qui présentent d'importants échanges de chaleur ou variations de température (par exemple une bougie qui brûle, ou un gaz sous pression qui se détend quand on ouvre un récipient).

Tant en mécanique qu'en thermodynamique, les physiciens utilisent des équations qui contiennent la variable « temps » : ils étudient comment le pendule oscille « au cours du temps » ou comment une bougie se consume « au cours du temps ». On dispose dans les deux cas des équations d'évolution dans le temps. Mais s'agit-il vraiment du même temps dans les deux situations ? On soupçonne que la réponse puisse être négative. Des différences existent et sont même notables.

La plus importante est que les phénomènes de la première classe sont réversibles, c'est-à-dire que si je les filme et que je regarde le film à rebours, de la fin vers le début, je vois un phénomène possible (l'oscillation renversée dans le temps d'un pendule sans frottement ne diffère pas de l'oscillation initiale). En revanche, les phénomènes de la seconde classe sont irréversibles *(voir l'article de Roger Balian)* : le film projeté à rebours montre un phénomène impossible, ou du moins jamais observé (un gaz ne se recomprime pas spontanément dans une partie d'un récipient après s'être dilaté).

Le temps reconstruit par la thermodynamique

Mais cette différence reflète quelque chose d'encore plus important. On a vu que l'on peut éliminer la variable temps des équations de la mécanique. Or il n'en est pas de même pour les équations de la thermodynamique ! En thermodynamique, il n'est pas possible de remplacer le temps par une mise en relation des grandeurs observables, les unes par rapport aux autres. Ainsi, la deuxième loi de la thermodynamique, qui stipule que l'entropie d'un système isolé ne décroît jamais « au cours du temps », est une équation que l'on ne peut pas traduire sous une forme relationnelle. Le « temps » qui apparaît dans les équations de la thermodynamique semble essentiel pour décrire le monde tel que nous l'observons.

Il convient alors d'introduire deux concepts différents, le « temps mécanique » et le « temps thermique ». Nous avons vu que nous devons renoncer au « temps mécanique » pour bien comprendre le monde. Mais le temps thermique est peut-être la véritable grandeur physique qui est à l'origine de notre conception intuitive du temps. Tout bien réfléchi, quand nous pensons au temps, nous lui associons de nombreuses caractéristiques apparentées à la thermodynamique. Par exemple, le temps de notre expérience quotidienne est irréversible. L'intuition que nous avons du temps correspond à quelque chose qui « s'écoule », à un « flot » qui a une direction déterminée. Tout cela a beaucoup plus de points communs avec les phénomènes irréversibles de la thermodynamique qu'avec le monde parfait et réversible de la mécanique.

Par conséquent, si l'on cherche à retrouver la notion intuitive de temps à partir d'une théorie fondamentale dépourvue de temps, on doit se tourner vers la thermodynamique. La physique de la fin du XIX^{e} siècle a montré que la thermodynamique n'est autre que la description approximative, macroscopique, de systèmes formés d'un nombre immense de composants, tels les atomes dont est constitué un gaz. Les lois de la thermodynamique sont liées au fait que nous ignorons la mécanique détaillée de chacun des composants du système. La

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

chaleur correspond ainsi à l'agitation chaotique des atomes et des molécules, agitation qu'il nous est impossible d'observer ou de connaître en détail. L'ignorance des détails microscopiques nous amène à décrire un gaz de façon moyenne, probabiliste, et cette description approximative conduit à la thermodynamique.

Si le seul véritable temps physique réside dans les phénomènes thermodynamiques, et si ces derniers ne sont qu'un effet des moyennes et de notre ignorance de ce qui se passe à l'échelle microscopique, il s'ensuit que l'impression du temps elle-même n'est due qu'à notre ignorance de la dynamique détaillée au niveau microscopique. Cette idée radicale est connue sous le nom de l'« hypothèse du temps thermique ».

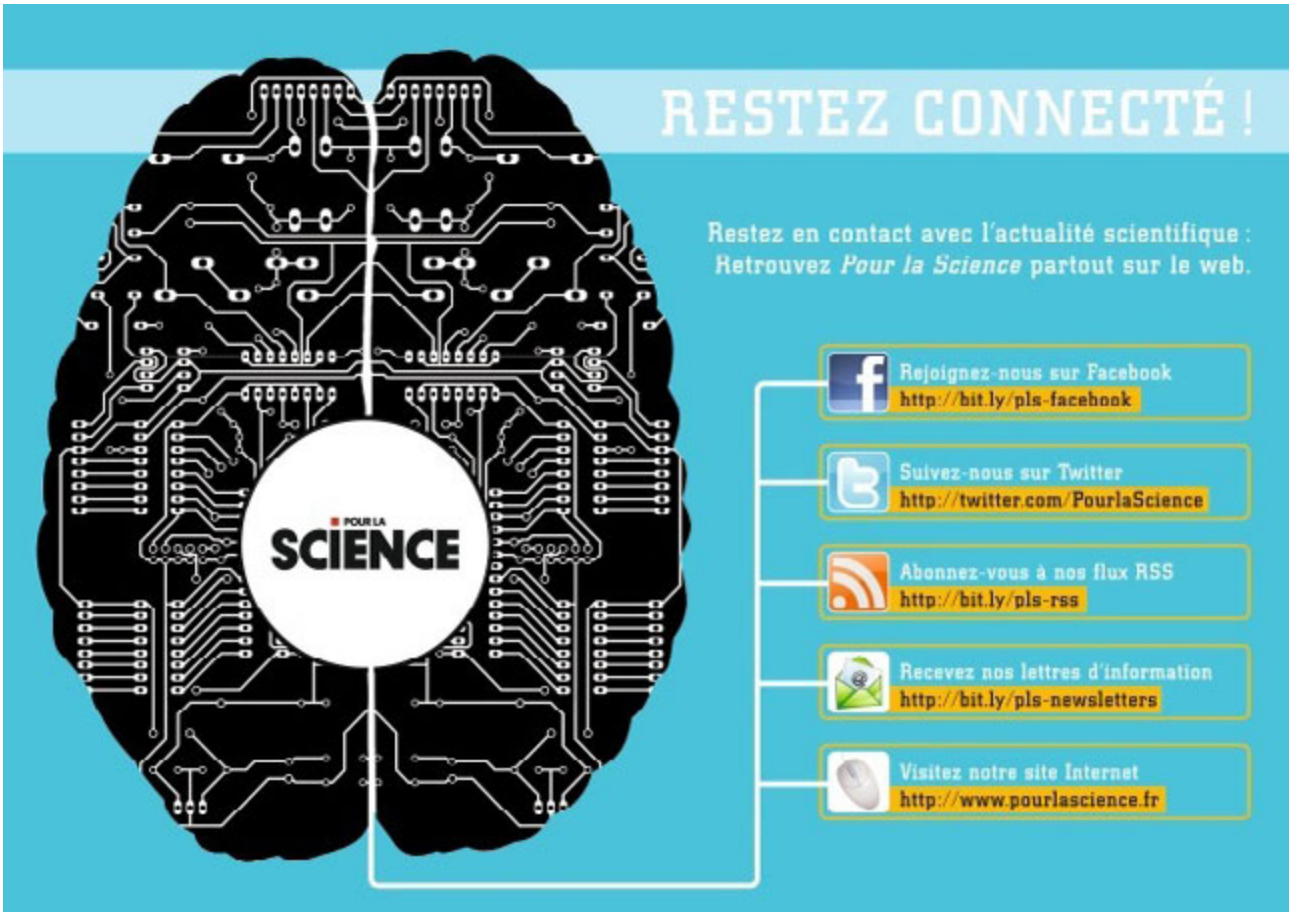
Cette idée a pu être exprimée de façon plus précise et mathématique, et étendue au cadre de la physique quantique. La démarche s'inspire notamment de la description probabiliste de l'état d'un système en physique statistique. L'une des pierres angulaires de cette discipline est que tout système tend vers un état d'équilibre où la probabilité de chaque microétat (c'est-à-dire chaque configuration possible des positions, vitesses, etc., des composants microscopiques du système) est proportionnelle à l'exponentielle $\exp(-E/kT)$, où E est l'énergie totale de la configuration, T la température et k une constante (la constante de Boltzmann). Comme le système tend vers cette distribution de probabilité, celle-ci définit de façon naturelle une direction d'évolution, c'est-à-dire un « temps ».

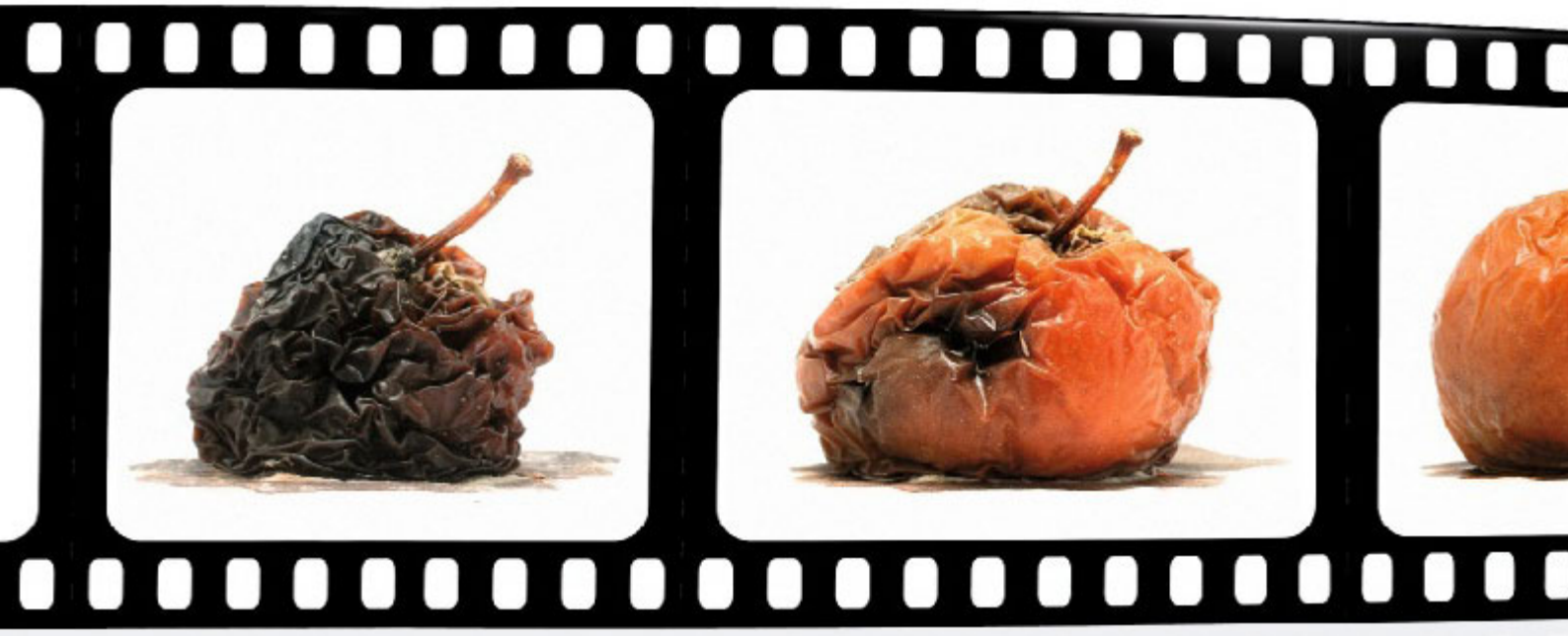
Le temps, effet de notre ignorance ?

On peut en quelque sorte inverser les choses et partir de l'« état statistique » d'un système (la donnée des probabilités de chacun des microétats), quel que soit cet état, et en déduire un « flot » associé, que l'on peut interpréter comme une évolution temporelle et qui définit ainsi un temps.

Sur le plan mathématique, ces idées se sont beaucoup appuyées sur des travaux des mathématiciens japonais Minoru Tomita et Masamichi Takesaki, réalisés vers 1970 et concernant les algèbres de von Neumann, des structures abstraites d'opérateurs utilisées notamment dans l'étude du formalisme mathématique de la physique quantique. En particulier, la théorie de Tomita-Takesaki permet de calculer une « évolution temporelle » à partir de tout état statistique. Et une analyse mathématique du « temps de Tomita » ainsi défini montre qu'il a effectivement les propriétés que nous associons habituellement au temps.

Le temps mécanique, nous l'avons vu, doit être éliminé de la mécanique classique, de la relativité et de la mécanique quantique, et il peut l'être. Restait à expliquer à quoi est due notre perception intuitive du temps, et nous avons proposé comme solution la notion de temps thermique. Si cette vision des choses est correcte, le temps n'est, en somme, rien d'autre qu'un effet de notre ignorance de l'état microscopique des systèmes macroscopiques. ■





Le paradoxe de l'ir

À l'échelle atomique, on ne peut distinguer la direction du passé de celle du futur. Mais alors, pourquoi la plupart des évolutions sont-elles irréversibles à notre échelle ?

Roger Balian

Source d'inspiration pour les écrivains et les artistes, l'écoulement inexorable du temps suscite depuis l'Antiquité les réflexions des philosophes. La plupart des physiciens, quant à eux, ne s'interrogent guère sur la nature du temps, tout au moins dans leur activité de recherche. Cependant, habitués depuis Galilée et Newton à utiliser un langage mathématique pour appréhender le monde, les physiciens ont défini avec précision l'expression consacrée de « flèche du temps ».

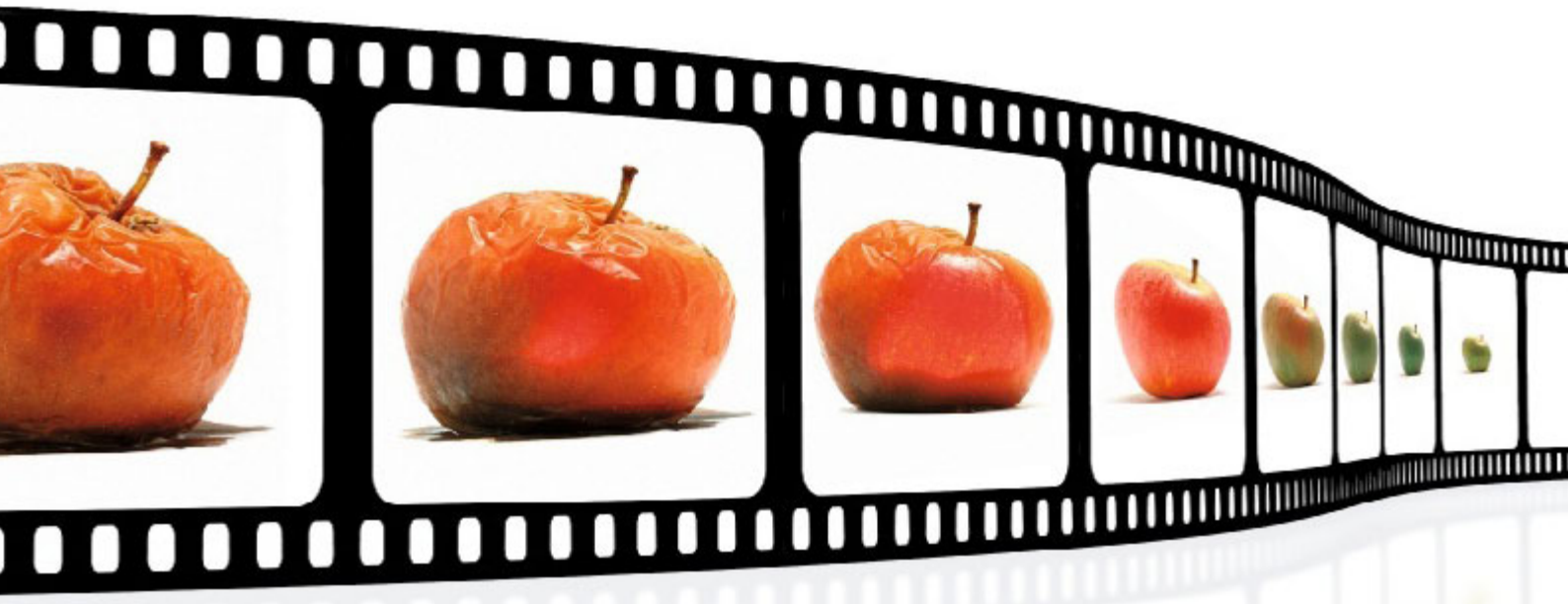
Pour eux, le temps apparaît comme une grandeur mesurable, représentée par un nombre pouvant prendre des valeurs continues et orientées : il a un sens, du passé vers le futur (de même que la température est orientée du froid vers le chaud). Dans cette perspective, le temps constitue, comme les trois coordonnées d'espace, l'une des variables qui figurent dans les lois décrivant un phénomène tel que le mouvement d'une particule ou la propagation de la chaleur dans un matériau.

L'idée floue de flèche du temps laisse alors place au concept scientifique d'irréversibilité. Si changer le sens du temps est impossible dans la réalité, « renverser le temps » présente une signification précise : c'est une opération mathématique qui consiste à changer le signe de la variable temps ($t \to -t$) dans les équations qui régissent l'évolution du processus considéré. Si ces équations restent inchangées, le processus considéré est réversible, car rien n'interdit en principe au processus inverse, où temps final et initial sont échangés, de se produire. Par exemple, le mouvement des planètes et des satellites, ou l'oscillation d'un pendule sans frottement *(voir l'encadré page 58)*, sont réversibles ; leurs lois ne changent pas dans un échange (virtuel) entre passé et avenir.

Cependant, dans le monde qui nous entoure, la plupart des phénomènes, tel le mélange de lait dans du café ou le mûrissement d'un fruit, sont irréversibles *(voir la figure 1)*. Les équations qui les gouvernent sont modifiées par renversement du temps, et les équations transformées ne correspondent à aucun phénomène physique observable. Le cinéma nous en donne l'intuition : un film projeté dans l'ordre chronologique inverse donne presque toujours une impression d'absurdité, qui traduit l'impossibilité pour la scène enregistrée de se dérouler à l'envers.

Cette question de symétrie ou d'asymétrie par renversement du temps a fait l'objet d'une multitude de travaux. Nous verrons ci-après que, selon le phénomène et l'échelle considérés, les équations de la physique sont, ou ne sont pas, réversibles. Un problème irritant se pose alors : les lois qui régissent un seul et même système peu-

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



réversibilité

Dis, au moins le sais-tu,
Que tout le temps qui passe
Ne se rattrape guère,
Que tout le temps perdu
Ne se rattrape plus
Barbara

vent être réversibles à l'échelle atomique, mais irréversibles à notre échelle. Nous montrerons sur un exemple simple comment cette contradiction apparente est levée. Nous présenterons enfin quelques aspects conceptuels récents de l'irréversibilité, liés soit à la mécanique quantique, soit au rôle de l'observateur.

Notons au préalable que les propriétés que l'on tendrait à attribuer au temps concernent en réalité des systèmes physiques. Ainsi, lorsque nous parlons de « mesure du temps », nous sous-entendons une opération indirecte : afin de déterminer le délai écoulé entre un événement et un autre, nous les mettons en correspondance avec une horloge, objet qui dénombre les battements d'un pendule ou pour plus de précision les oscillations d'un cristal de quartz – ce qui suppose une analyse préalable, expérimentale et théorique, du mouvement du pendule ou du quartz. De même, l'expression « flèche du temps » est trompeuse, car le concept d'irréversibilité se réfère non pas à une propriété du temps en soi, mais à un processus spécifique concernant tel ou tel objet.

À l'échelle atomique, les distances en jeu sont de l'ordre de la fraction de nanomètre (milliardième de mètre). Tous les systèmes s'y révèlent composés d'électrons et de noyaux atomiques. Ces objets élémentaires, chargés les uns négativement, les autres positivement, interagissent *via* des forces électromagnétiques véhiculées par des photons ; ils s'assemblent ainsi pour former des atomes, des ions, des molécules ou des solides.

Les équations qui gouvernent ces mécanismes, établies avec une précision considérable, permettent en principe d'analyser à cette échelle tous les phénomènes. Mais leur résolution pratique pose des problèmes redoutables si les composants élémentaires sont trop nombreux ou disposés en désordre.

1. LA PLUPART DES PHÉNOMÈNES que l'on observe à notre échelle sont irréversibles. La maturation, puis le pourrissement, d'un fruit en est un exemple. Déroulé dans le sens chronologique inverse, un tel processus ne se produit jamais et nous paraît absurde. Pourtant, les lois physiques qui régissent le monde microscopique sont (à une exception négligeable près) réversibles : elles ne distinguent pas le passé du futur...

L'ESSENTIEL

- ✔ **Selon l'échelle en jeu, les phénomènes physiques peuvent ou non se dérouler dans les deux sens du temps.**
- ✔ **À l'échelle macroscopique, l'évolution spontanée d'un système isolé est irréversible : son entropie ne peut pas diminuer.**
- ✔ **L'irréversibilité macroscopique, qui semble paradoxale en raison de la réversibilité des lois microscopiques sous-jacentes, s'explique par l'immensité du nombre de composants en jeu.**

© Shutterstock/Engin Pratheri (h) ; © Martin Gallagher/Corbis (pommes)

UNE LOI RÉVERSIBLE OU IRRÉVERSIBLE ?

Un exemple de phénomène réversible est le mouvement d'un pendule simple sans frottement *(a)*. Pour de faibles amplitudes d'oscillation, l'angle $\alpha(t)$ entre le pendule et la verticale est régi par l'équation :

(1) $d^2\alpha(t)/dt^2 + k\,\alpha(t) = 0$,

où k est une constante positive ($d^2\alpha(t)/dt^2$ désigne la dérivée seconde de la fonction $\alpha(t)$ par rapport au temps t). La réversibilité se traduit par le fait que l'équation garde la même forme lorsqu'on renverse le temps, c'est-à-dire lorsqu'on exprime les choses *via* le nouveau paramètre temporel $t' = -t$.

Pour le montrer, exprimons l'équation (1) en termes de : $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$.

La dérivée première $d\alpha(t)/dt$ de $\alpha(t)$ est égale à $-d\beta(t')/dt'$, et la dérivée seconde $d^2\alpha(t)/dt^2$ est égale à $+d^2\beta(t')/dt'^2$. Par suite, dans la transformation $t \to t' = -t$, l'équation initiale (1) garde exactement la même forme :

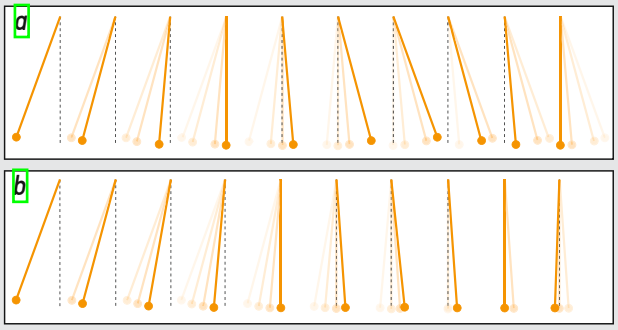
$d^2\beta(t')/dt'^2 + k\,\beta(t') = 0$.

Conséquence : si $\alpha(t)$ est une solution possible de l'équation initiale, $\alpha(t') = \alpha(-t)$ est aussi une solution possible, qui est la forme renversée dans le temps de $\alpha(t)$. Le phénomène décrit par (1) est ainsi réversible.

Dans le cas où le pendule perd de l'énergie par frottement en oscillant *(b)*, son équation est de la forme :

(2) $d^2\alpha(t)/dt^2 + f\,d\alpha(t)/dt + k\,\alpha(t) = 0$,

où f est un coefficient de frottement.



Or si l'on pose $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$, l'équation (2) est modifiée en :

$d^2\beta(t')/dt'^2 - f\,d\beta(t')/dt' + k\,\beta(t') = 0$,

qui n'est plus de la même forme. En conséquence, si $\alpha(t)$ est une solution possible de l'équation (2), la fonction « renversée » $\alpha(t') = \alpha(-t)$ n'est pas solution de cette équation et ne peut décrire un processus réel. Le phénomène décrit par l'équation (2) est irréversible.

Le raisonnement fait ici est le prototype de ceux qui permettent d'étudier d'autres symétries (ou asymétries) des équations ou lois physiques.

L'une des propriétés de ces équations est l'invariance par renversement du temps. La physique et la chimie à l'échelle atomique sont donc réversibles : rien n'y serait changé si l'on échangeait passé et futur.

La flèche du temps, une question d'échelle

Ce qui, à l'échelle atomique, est valable pour le temps l'est aussi pour l'espace. Autrement dit, les équations relatives à cette échelle sont aussi invariantes par changement de signe des coordonnées d'espace. L'opération peut se visualiser en imaginant que l'on remplace le système par son image dans un miroir. Si une molécule est chirale, c'est-à-dire si elle diffère de son image comme notre main droite diffère de notre main gauche (*kheiros* signifie main en grec), l'invariance des lois dans une symétrie par rapport à un plan implique l'existence d'une autre molécule, symétrique de la première, qui aura des propriétés similaires. Ces considérations ont guidé Louis Pasteur dans son étude des deux acides tartriques, dont les cristaux sont chiraux et symétriques l'un de l'autre, mais dont seul l'un est produit dans les processus biologiques.

Depuis le milieu du XX^e siècle, l'échelle subnucléaire, où les distances caractéristiques sont de l'ordre du femtomètre (millionième de nanomètre, soit 10^{-15} mètre), est explorée à l'aide de grands accélérateurs comme le LHC récemment mis en service au CERN, à Genève. Les nombreuses particules ainsi découvertes ont révélé des composants élémentaires nommés quarks, leptons et bosons de jauge. On a établi que ces composants interagissent par des forces de quatre types différents. Par ordre d'intensité décroissante, il s'agit de l'interaction forte, grâce à laquelle trois quarks se lient pour former un proton ou un neutron ; de l'interaction électromagnétique entre particules chargées ; de l'interaction faible, responsable de la radioactivité bêta ; et de l'interaction gravitationnelle, proportionnelle à la masse.

Les interactions forte, électromagnétique et gravitationnelle sont invariantes sous l'effet d'un changement de signe du temps ainsi que des coordonnées d'espace. Toutefois, l'interaction faible présente moins de symétries. Jusque dans les années 1950, il était admis comme une évidence que toutes les lois de la nature étaient symétriques par réflexion dans un miroir. En 1956, les théoriciens sino-américains Tsung-Dao Lee et Chen-Ning Yang mirent ce dogme en question pour l'interaction faible et suggérèrent à l'expérimentatrice Chien-Shiung Wu (connue, même aux États-Unis où elle travaillait, comme « Madame Wu ») des tests sur la radioactivité bêta, qui révélèrent une asymétrie miroir maximale ; ce résultat inattendu valut à T.-D. Lee et C.-N. Yang le prix Nobel dès 1957.

L'asymétrie spatiale suggéra de tester aussi le comportement des lois de l'interaction faible par rapport au renversement du temps. En 1964, les Américains James Cronin, Val Fitch, James Christenson et le Français René Turlay découvrirent à l'accélérateur de Brookhaven une violation indirecte de cette symétrie dans la désintégration du méson K^0 *(voir l'article de Marie-Hélène Schune)*. Cette violation est minuscule (elle est de 1 pour 300) et n'a aucune conséquence sur les phénomènes terrestres ; mais la légère distinction qu'elle crée entre matière et antimatière pourrait avoir joué un rôle dans les circonstances extrêmes qui régnaient peu après le Big Bang : l'absence d'antimatière dans l'Univers pourrait trouver là son explication.

À l'autre extrême, en sautant à l'échelle du Système solaire (une minute-lumière, ou 18 millions de kilomètres), les lois de la mécanique céleste sont réversibles : si l'on imaginait que les vitesses de toutes les planètes et de tous les satellites soient instantanément et exactement inversées, on retrouverait dans 50 ans ces objets exactement dans les mêmes positions qu'il y a 50 ans. Pour des distances plus grandes encore, à l'échelle cosmologique (des milliards d'années-lumière), on observe une évidente flèche du temps : l'Univers est en expansion, et non en contraction. Cependant, les lois à cette échelle sont encore réversibles et rien n'empêche, dans les théories actuelles, d'imaginer un Univers qui serait en contraction.

C'est aux échelles intermédiaires, les nôtres, que l'irréversibilité se manifeste le plus clairement. L'expérience quotidienne

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

met en évidence une multitude de processus irréversibles. Un morceau de sucre se dissout dans une tasse de café, un glaçon fond dans un verre d'eau, mais on n'a jamais vu ce morceau de sucre ou ce glaçon se reconstituer. La combustion de l'essence propulse une voiture en dégageant des gaz d'échappement, mais faire reculer la voiture en l'alimentant de gaz brûlés ne saurait produire de l'essence. De même, l'action du frein ralentit la voiture en transformant son énergie cinétique en chaleur, mais il est impensable d'accélérer le véhicule en réchauffant ses freins.

L'irréversibilité, phénomène quotidien

L'analyse scientifique de tels phénomènes a été amorcée au XVIIIe siècle et accomplie au cours du XIXe. Il importe d'abord de préciser que les concepts de réversibilité et d'irréversibilité ne concernent que les systèmes isolés. En mettant une pincée de sel dans un verre d'eau et en isolant cet ensemble, on aboutit après évolution à un équilibre où le sel s'est dissous. Si l'on part d'une eau salée isolée du monde extérieur, elle ne peut se séparer d'elle-même en ses constituants ; cependant, cette séparation est possible pour de l'eau salée non isolée, puisqu'on peut en extraire de l'eau pure et du sel par distillation. De même, la chaleur ne s'écoule jamais spontanément d'un corps froid vers un corps chaud ; mais on peut, grâce à un apport extérieur d'énergie électrique, transférer de la chaleur de l'intérieur d'un réfrigérateur vers l'air de la cuisine.

C'est Newton qui, le premier, a formulé à la fin du XVIIe siècle une loi irréversible, qui ne garde pas la même forme lorsque t est changé en $-t$; elle portait sur la viscosité d'un fluide. Au début du XIXe siècle, Joseph Fourier élucida un autre phénomène irréversible, la propagation de la chaleur, et parvint à en résoudre les équations. Et au cours du demi-siècle suivant, les lois de nombreux autres processus irréversibles ou dissipatifs ont été établies : la loi de Coulomb du frottement, les équations de Navier-Stokes de l'écoulement d'un fluide visqueux, l'effet Joule (échauffement d'un conducteur parcouru par un courant), la loi de Fick gouvernant la diffusion de particules dans un solvant, les équations de la cinétique chimique, etc.

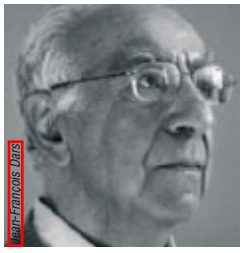
Face à cette profusion de phénomènes irréversibles, le « deuxième principe de la thermodynamique » a fourni un point de vue synthétique. Sa formulation initiale est due à Sadi Carnot, dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* parues en 1824. Dans un contexte où les machines à vapeur commençaient à se développer de façon purement empirique, Carnot analysa une machine thermique en la considérant comme un dispositif qui produit un travail mécanique par exploitation de la tendance naturelle de la chaleur à s'écouler irréversiblement d'une source chaude vers une source froide. Il montra que son rendement ne pouvait dépasser une certaine borne, qui est fonction des températures de ces deux sources – prototype des raisonnements afférents au deuxième principe.

L'universalité du principe de Carnot fut reconnue vers le milieu du XIXe siècle, et divers énoncés équivalents furent donnés. Celui imaginé par Rudolf Clausius conduisit ce physicien allemand à introduire en 1865 une nouvelle notion, celle d'« entropie », une certaine fonction S des diverses variables physiques caractérisant l'état d'un système. Ce concept est au cœur de la formulation actuelle due au physicien américain Herbert Callen et datant du milieu du XXe siècle.

Dans cette forme moderne, le deuxième principe s'exprime ainsi : lorsqu'un système isolé évolue spontanément, l'entropie de son état final ne peut être inférieure à celle de son état initial. Cet énoncé met en évidence une flèche du temps, associée au sens de variation de l'entropie. Il est général, car les variables d'état dont dépend l'entropie peuvent inclure des grandeurs de natures diverses, telles l'énergie, la densité, la concentration d'un mélange, la déformation d'un solide ou la composition chimique. Mais l'énoncé est abstrait, en raison de la nature assez mystérieuse dans ce cadre de l'entropie – sa signification ne se clarifie, comme nous le verrons, qu'en comparant les échelles macroscopique (la nôtre) et microscopique (celle des molécules).

Peut-on se satisfaire de la coexistence de théories impliquant l'une un comportement réversible à l'échelle atomique, l'autre un comportement irréversible à notre échelle ? Pour la plupart des chercheurs, la réponse est non, car ils adhèrent au réductionnisme : même lorsque cela n'a pas d'incidence sur leur activité quotidienne, ils admettent que les lois auxquelles obéit un système macroscopique doivent pouvoir se déduire des propriétés, considérées

L'AUTEUR



Roger BALIAN est chercheur à l'Institut de physique théorique du CEA (Commissariat à l'énergie atomique), à Saclay près de Paris. Il est aussi membre de l'Académie des sciences.

BIBLIOGRAPHIE

R. Balian, **From Microphysics to Macrophysics**, Springer Verlag, 2007.

A. Allahverdyan *et al.*, **Curie-Weiss model of the quantum measurement process**, *Europhysics Letters*, vol. 61, pp. 452-458, 2003.

É. Klein et M. Spiro (éds.), **Le temps et sa flèche**, Flammarion, 1996. Voir aussi : http://ipht.cea.fr/Docspht, publications t94/009, t94/130 et t04/185.

H. D. Zeh, **The Physical Basis of the Direction of Time**, Springer-Verlag, 1989.

S. Brush, **The Kind of Motion we Call Heat**, North-Holland, 1986.

P. C. W. Davies, **The Physics of Time Asymmetry**, University of California Press, 1977.

M. Fink, **Les miroirs à retournement temporel**, *Pour la Science*, n° 103, mai 1986.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

comme plus fondamentales, de ses constituants et de leurs relations mutuelles.

Cependant, ce changement d'échelle fait apparaître des propriétés nouvelles, émergentes, dues à l'organisation et au comportement collectif des composants, propriétés *a priori* imprévisibles en raison du nombre gigantesque de composants. Les succès de la biologie moléculaire dans la compréhension des êtres vivants, les apports de la physique moléculaire à la chimie, illustrent l'efficacité de cette démarche unificatrice.

En physique, on a commencé à la fin du XIX^{e} siècle à montrer que les lois régissant les matériaux à notre échelle peuvent se déduire de lois relatives à l'échelle atomique. Tel est l'objet de la mécanique statistique, dont les premiers succès ont porté sur les gaz.

Auparavant, vers 1865, la physique du continu triomphait. Mais la nature de la chaleur et, en conséquence, la signification de l'entropie restaient à élucider. L'hypothèse selon laquelle la matière serait constituée de molécules, dont le mouvement se manifesterait à nous sous forme de pression et de chaleur, n'avait encore aucun support expérimental ; elle était devenue hétérodoxe après avoir été courante un siècle auparavant. En s'appuyant néanmoins sur cette idée, James Clerk Maxwell en Écosse, puis Ludwig Boltzmann à Vienne, face à l'hostilité de scientifiques éminents, parvinrent non seulement à expliquer les propriétés, déjà connues, des gaz à l'équilibre, mais surtout à prévoir avec succès les comportements, inattendus, de la viscosité et de la conductivité calorifique des gaz en fonction de leur densité et leur température.

Un tel succès se heurtait pourtant à une objection mathématique sérieuse, le « paradoxe de l'irréversibilité », souligné par l'Autrichien Josef Loschmidt en 1876, le Français Henri Poincaré en 1889, et l'Allemand Ernst Zermelo en 1896. La théorie cinétique des gaz de Maxwell et Boltzmann repose uniquement sur les équations du mouvement des molécules, qui décrivent leurs déplacements dans une enceinte et les collisions élastiques qu'elles subissent entre elles ou sur les parois. Or ces équations sont invariantes lorsqu'on y change le signe du temps. Comment comprendre alors que ces seules équations, réversibles, puissent donner naissance aux lois qui gouvernent le comportement macroscopique du gaz constitué par ces molécules, et en particulier aux irréversibilités exprimées par le deuxième principe de la thermodynamique ? Tel est le paradoxe de l'irréversibilité.

Comment émerge l'irréversibilité

L'élucidation de ce paradoxe a été suggérée par Boltzmann et rendue rigoureuse au cours des décennies suivantes. Nous allons l'esquisser sur un modèle simple. Considérons une enceinte constituée de deux parties A et B de même volume V. Un gaz de N molécules est initialement introduit dans la partie A, qui est ensuite mise en communication avec la partie B *(voir la figure 2)*. L'état macroscopique de sa configuration initiale,

IRRÉVERSIBILITÉS QUANTIQUES

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux sont consacrés à des irréversibilités d'un type différent. À l'échelle atomique, les objets obéissent aux règles de la mécanique quantique. C'est là une source de phénomènes étranges tels que la « cohérence », possibilité pour un système d'être dans un état où se superposent deux configurations différentes. On peut par exemple préparer un atome en sorte qu'il soit à la fois dans son état fondamental et dans un état excité ; si cette situation pouvait se présenter à notre échelle, un « chat de Schrödinger » pourrait être à la fois mort et vivant. L'exploitation de telles propriétés singulières est susceptible de conduire à des « ordinateurs quantiques » extrêmement puissants ; elle est cependant difficile, car la cohérence quantique est souvent détruite en un temps extrêmement bref.

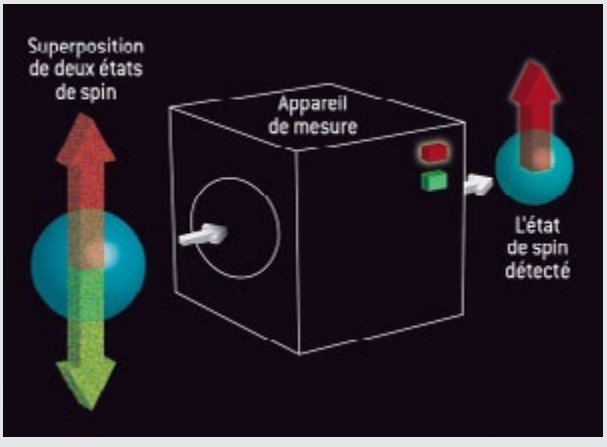
Ce phénomène irréversible, nommé décohérence, est causé par les faibles interactions incontrôlées du système avec son environnement. S'il était isolé, le système évoluerait de façon réversible selon l'équation de Schrödinger (qui régit son comportement au cours du temps) et conserverait sa cohérence quantique ; ici, l'irréversibilité est due au couplage avec le grand nombre de degrés de liberté de l'environnement.

La théorie quantique est irréductiblement probabiliste. Lorsqu'on effectue des mesures sur des objets quantiques préparés dans des conditions identiques, on trouve en général des résultats différents, affectés de certaines probabilités. Mais chaque mesure fournit un résultat unique, bien défini, même lorsque l'objet est dans un état superposé. Cette propriété, nommée « réduction du paquet d'ondes », implique une irréversibilité, et semble donc en contradiction avec la réversibilité de l'équation de Schrödinger.

Ce « problème de la mesure », posé dès les années 1920, fait encore l'objet de discussions. On invoque souvent une décohérence due à l'environnement. Une autre solution, proposée en 2003 par Armen Allahverdyan, de l'Institut de physique d'Erevan (Arménie), Theo Nieuwenhuizen, de l'Université d'Amsterdam, et l'auteur (R. Balian), repose sur le caractère macroscopique de l'index de l'appareil de mesure. En résolvant l'équation de Schrödinger du système appareil-objet, on détermine, pour un ensemble de mesures, la loi de probabilité qui gouverne les configurations finales issues d'un état initial donné. On déduit alors du grand nombre de degrés de liberté de l'index qu'une indication bien définie émerge avec une quasi-certitude lors de chaque mesure.

Cette solution du problème de la mesure, comme celle du paradoxe de l'irréversibilité, est probabiliste : les propriétés de la mesure quantique ne sont pas établies dans l'absolu, mais avec une probabilité qui tend vers 1 lorsque l'appareil devient grand.

La mesure en mécanique quantique est un processus qui met en jeu de l'irréversibilité.



© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

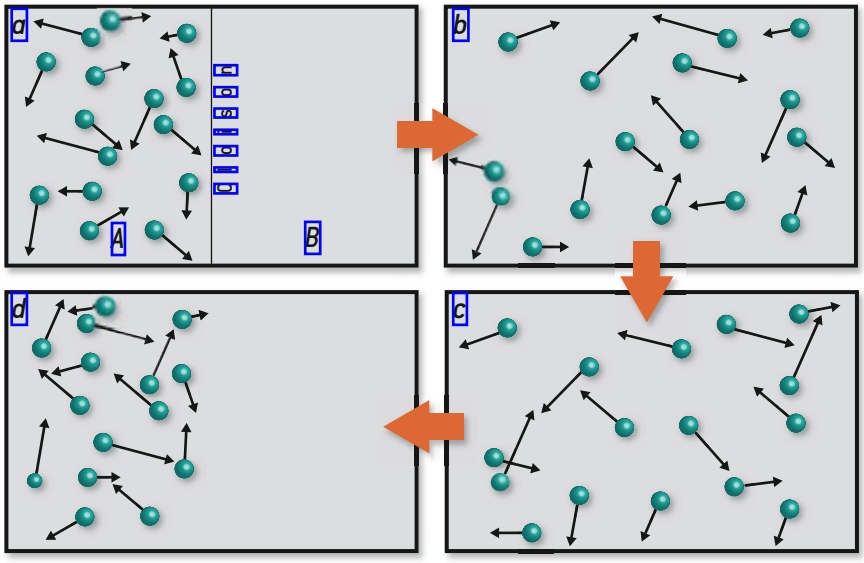
notée *(a)*, est caractérisé par la densité N/V du gaz (ainsi que par sa température, qui ne jouera ici aucun rôle). Après un certain délai T, les molécules se sont dispersées et ont atteint une configuration, notée *(b)*, où le gaz occupe tout le volume de l'enceinte, avec une densité égale à $N/(2V)$. L'expansion *(a)* → *(b)* est irréversible à notre échelle : on n'a jamais vu de processus inverse où un gaz se contracterait spontanément en laissant vide une partie de l'espace disponible.

À l'échelle microscopique, le mouvement des molécules, caractérisé à chaque instant par leurs positions et vitesses, est complexe en raison des collisions, mais réversible. Pour mettre cette caractéristique en évidence, imaginons que l'on renverse toutes les vitesses des molécules dans la configuration *(b)*, où tout l'espace disponible a été occupé. Notons *(c)* la configuration renversée ainsi obtenue. En repartant de là, les trajectoires remonteraient le temps ; à la fin du délai T, les molécules se retrouveraient toutes groupées dans la partie A, dans une configuration, notons-là *(d)*, qui ne diffère de la configuration initiale *(a)* que par le sens des vitesses.

Or on n'observe jamais de transformations du type *(c)* → *(d)*, bien que le raisonnement précédent semble montrer leur possibilité ! Pourquoi ? Notons d'abord que la description microscopique du gaz est nécessairement probabiliste en raison du nombre gigantesque de constituants (un litre d'air contient $2{,}7 \times 10^{22}$ molécules). Lorsqu'on injecte N molécules dans A, on ne peut connaître leurs positions individuelles, et il convient d'attribuer la même probabilité p_1 à toutes les Ω_1 configurations microscopiques de type *(a)* compatibles avec l'état macroscopique du gaz.

Dénombrons les Ω_1 configurations possibles de type *(a)*. Pour ce faire, remplaçons les positions dans le volume V par une grille de Q sites discrets (cet artifice se justifie par la mécanique quantique, qui fournit pour Q, après élimination des vitesses, un nombre de l'ordre de 10^{100} par litre de gaz). Or il existe $\Omega_1 = Q!/[N!\,(Q-N)!]$ façons de disposer les N molécules sur les Q sites. Ainsi, chacune de ces Ω_1 configurations a la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$.

De la même façon, si les N molécules se répandent dans le volume A + B, elles ont la probabilité $p_2 = 1/\Omega_2$ de prendre l'une ou l'autre des $\Omega_2 = (2Q)!/[N!\,(2Q-N)!]$ configurations possibles dans le volume $2V$.



2. L'EXPANSION D'UN GAZ illustre le paradoxe de l'irréversibilité. Le gaz occupe la partie A du récipient *(a)*, puis on retire la cloison. Au bout d'un temps T, il s'est répandu dans le volume A + B en suivant des trajectoires qui, au niveau microscopique, sont réversibles *(b)*. Imaginons que toutes les vitesses des molécules soient alors subitement et exactement inversées *(c)*. À l'instant $2T$, le gaz se retrouverait spontanément confiné dans le volume A *(d)*. Mais cela ne se produit jamais : d'une part, les configurations du type *(c)* sont en nombre négligeable par rapport à toutes celles qui sont possibles pour un gaz occupant le volume A + B ; d'autre part, on est incapable, expérimentalement, d'inverser toutes les vitesses microscopiques pour passer d'une configuration *(b)* à son inverse *(c)*.

Mais les configurations du type *(c)*, obtenues en renversant les vitesses des configurations de type *(b)*, bien qu'elles occupent le volume A + B, sont exceptionnelles : elles sont en correspondance biunivoque avec celles du type *(b)*, donc du type *(a)*, de sorte qu'il n'y en a qu'un nombre Ω_1.

Par conséquent, la probabilité pour qu'un gaz occupant tout le volume A + B soit dans une configuration renversée du type *(c)*, qui donnerait lieu à une contraction vers *(d)*, vaut $\Omega_1/\Omega_2 = 2^{-N}$. Il s'agit d'un nombre dont la petitesse défie l'entendement tant N, de l'ordre de 10^{22}, est grand : pour seulement $N = 60$ molécules, cette probabilité Ω_1/Ω_2 est inférieure au milliardième de milliardième ! Autrement dit, le processus inverse *(c)* → *(d)* n'est pas mathématiquement interdit, mais il est totalement improbable dans la réalité.

La contraction spontanée d'un gaz dans une partie du volume qu'il occupait n'est pas mathématiquement interdite, mais elle est totalement improbable.

Le paradoxe de l'irréversibilité a été formulé d'une autre façon : Poincaré a démontré qu'un système régi par une dynamique réversible revient au voisinage de sa configuration initiale au bout d'un certain délai, nommé temps de récurrence. Le gaz, initialement dans l'état *(a)*, devrait donc retourner au bout de ce temps dans un état voisin de *(a)*, en se concentrant à nouveau à l'intérieur du volume A. La résolution du paradoxe tient encore à l'immensité du nombre des configurations, qui implique un temps de récurrence incomparablement supérieur à l'âge de l'Univers. On n'a donc aucune chance de voir un jour un gaz se contracter spontanément après s'être dilaté – même si c'est mathématiquement assuré.

Tant en mécanique statistique qu'en physique quantique *(voir l'encadré page 60)*, l'émergence de l'irréversibilité se comprend grâce à l'emploi de probabilités. Or ce concept ne se rapporte pas seulement à l'objet étudié, mais aussi à son observateur : la probabilité d'un événement caractérise l'information dont nous disposons sur cet événement dans les circonstances considérées. C'est parce que nous ne sommes pas capables de contrôler ou de connaître les positions des N molécules dans le volume A que nous attribuons à chaque configuration

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

de type *(a)* la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$, et nos prévisions ultérieures se font à partir de là.

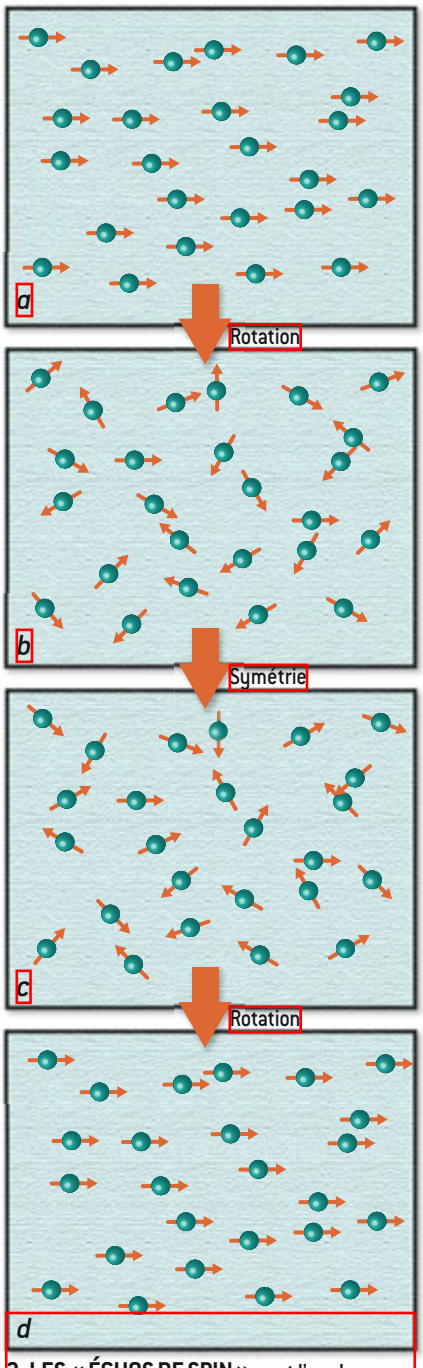
La théorie de l'information, créée en 1948 par le mathématicien américain Claude Shannon, permet de mesurer notre incertitude, c'est-à-dire la quantité d'information qui nous manque en raison du caractère probabiliste de la description ; cette quantité est proportionnelle au logarithme de la probabilité. On a pu alors montrer que l'entropie S introduite en thermodynamique s'interprète (à une constante multiplicative près) comme une mesure de notre incertitude à l'échelle microscopique lorsque notre connaissance du système se limite à ses grandeurs macroscopiques, ou encore comme notre perception du désordre.

Par exemple, l'entropie S_1 de l'état où le gaz occupe le volume A s'identifie à $S_1 = k_B \ln \Omega_1$, où $k_B = 1{,}38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin est la constante de Boltzmann ; cette formule, qui a clarifié la signification de l'entropie, est si remarquable qu'on l'a gravée sur la tombe de Boltzmann, à Vienne. Lorsque le gaz se répand dans le volume A + B, notre incertitude augmente puisque les positions des molécules sont encore moins bien précisées ; l'accroissement $k_B(\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = N\, k_B \ln 2$ de l'entropie mesure l'augmentation de notre incertitude. C'est en ce sens que le deuxième principe de la thermodynamique exprime la croissance du désordre.

L'observateur a son rôle

Dans l'expérience de pensée sur le gaz qui se répand dans le volume A + B, l'irréversibilité de l'expansion, alors que les équations microscopiques du mouvement sont réversibles, est liée à notre incapacité à renverser exactement les vitesses de toutes les molécules. Cependant, depuis les travaux de l'Américain Erwin Hahn, vers 1950, les expérimentateurs savent réaliser une opération analogue sur des systèmes particuliers, les substances paramagnétiques *(voir la figure 3)*. Celles-ci comportent des moments magnétiques élémentaires, ou spins, qui, lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur horizontal, s'alignent dans la direction de ce champ ; le matériau est alors aimanté, situation ordonnée analogue à l'état initial de notre gaz.

La suppression brusque de ce champ laisse les spins libres de tourner indépendamment, chacun avec une vitesse bien définie qui dépend de sa position en raison de l'hétérogénéité du milieu ; la désorientation relative des spins se traduit à notre échelle par une désaimantation progressive, un processus irréversible analogue à l'expansion de notre gaz. Au bout d'une durée T, les spins pointent dans des directions qui semblent quelconques, avec une apparence de désordre.



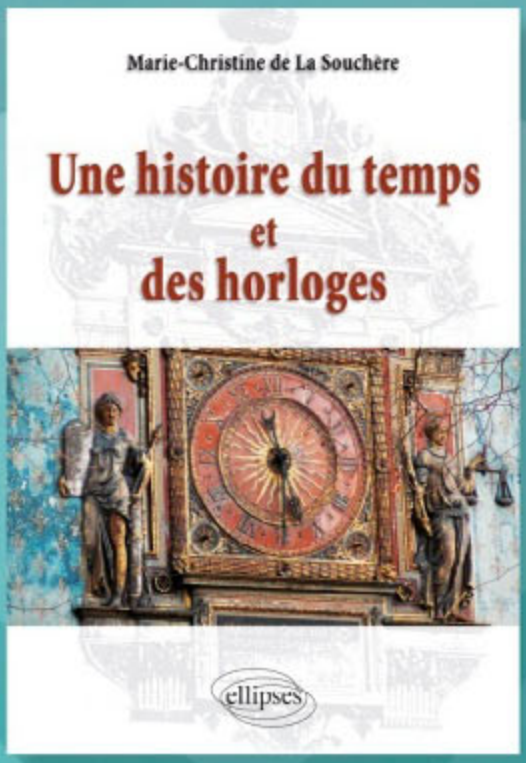
3. LES « ÉCHOS DE SPIN » sont l'un des rares cas où l'on est capable d'inverser l'évolution spontanée d'un système. L'état initial d'un échantillon de matériau paramagnétique, aimanté dans la direction horizontale du plan *(a)*, est préparé en appliquant à l'échantillon un champ magnétique dans cette direction, qui oriente tous les spins. La suppression de ce champ laisse les spins tourner dans le plan, chacun avec une vitesse propre (sous l'effet d'un champ non homogène perpendiculaire au plan de la figure). L'aimantation a ainsi disparu au bout d'un temps T *(b)*. Une brève impulsion électromagnétique, bien choisie, effectue alors une symétrie par rapport à l'axe horizontal de tous les spins *(c)*. Les rotations inégales des spins les ramènent à l'instant $2T$ dans leur état initial *(d)*.

Remarquablement, en appliquant à l'échantillon une brève impulsion de champ magnétique convenablement choisie, les expérimentateurs sont capables d'effectuer globalement sur tous les spins une symétrie par rapport à l'axe horizontal, réalisant ainsi une opération analogue au renversement hypothétique des vitesses des molécules du gaz. La rotation spontanée des spins, chacun avec sa vitesse propre, se poursuit et les ramène alors tous au bout du délai T dans leur orientation initiale : l'échantillon s'est réaimanté malgré l'absence du champ horizontal externe. On a ainsi produit un « écho de spin » : le système est revenu à son état initial comme s'il avait remonté le temps. En fait, l'observateur savait que l'état désaimanté présentait un ordre caché, car il était issu de l'état aimanté, et il a réussi à tirer parti de cette information. Les échos de spin sont devenus une technique courante en imagerie par résonance magnétique.

Une idée similaire est exploitée en acoustique par Mathias Fink et son équipe à l'ESPCI (École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris). La diffusion par un objet complexe d'ondes ultrasonores originellement émises par une source simple est un processus à première vue irréversible, car les ondes diffusées ont une apparence aléatoire. Imaginons cependant que l'on entoure l'objet diffuseur de capteurs pouvant détecter et enregistrer les signaux reçus, puis émettre une onde identique mais variant en sens inverse dans le temps, les premières oscillations émises reproduisant les dernières reçues. Cela permet d'effectuer un « retournement temporel » des ondes ultrasonores, qui convergent alors vers l'objet en reproduisant à l'envers les ondes divergentes originales.

Une telle focalisation, produite en dépit de l'hétérogénéité du milieu diffuseur, est à la base de techniques innovantes notamment pour briser des calculs rénaux ou pour détecter des tumeurs. Voilà un exemple remarquable d'application d'un renversement de la flèche du temps !

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



Ne perdez pas de temps, lisez ellipses

32 rue Bargue 75740 Paris cedex 15 www.editions-ellipses.fr

Marie-Hélène Schune

Du sens du temps à la viola

Pour les particules subatomiques, passé et futur sont indifférents... ou presque. Cette légère asymétrie par rapport au sens du temps est liée à une autre asymétrie, entre particules et antiparticules, qui fait l'objet de recherches actives.

L'Univers ne contient quasiment pas d'antimatière. Quel est le rapport entre la matière, l'antimatière et l'écoulement du temps ? On le voit mal, du moins à notre échelle et à l'échelle cosmique. Toutefois, les physiciens en ont découvert un à l'échelle microscopique.

Les interactions entre les particules élémentaires qui composent la matière sont décrites par une théorie dont la version la plus élaborée et la mieux testée aujourd'hui est nommée modèle standard. Ce dernier a d'abord été construit de façon à ce que les particules de matière et les particules d'antimatière y jouent le même rôle. Mais les constatations se sont accumulées : cette symétrie n'est pas respectée dans la nature, et il a fallu en tenir compte.

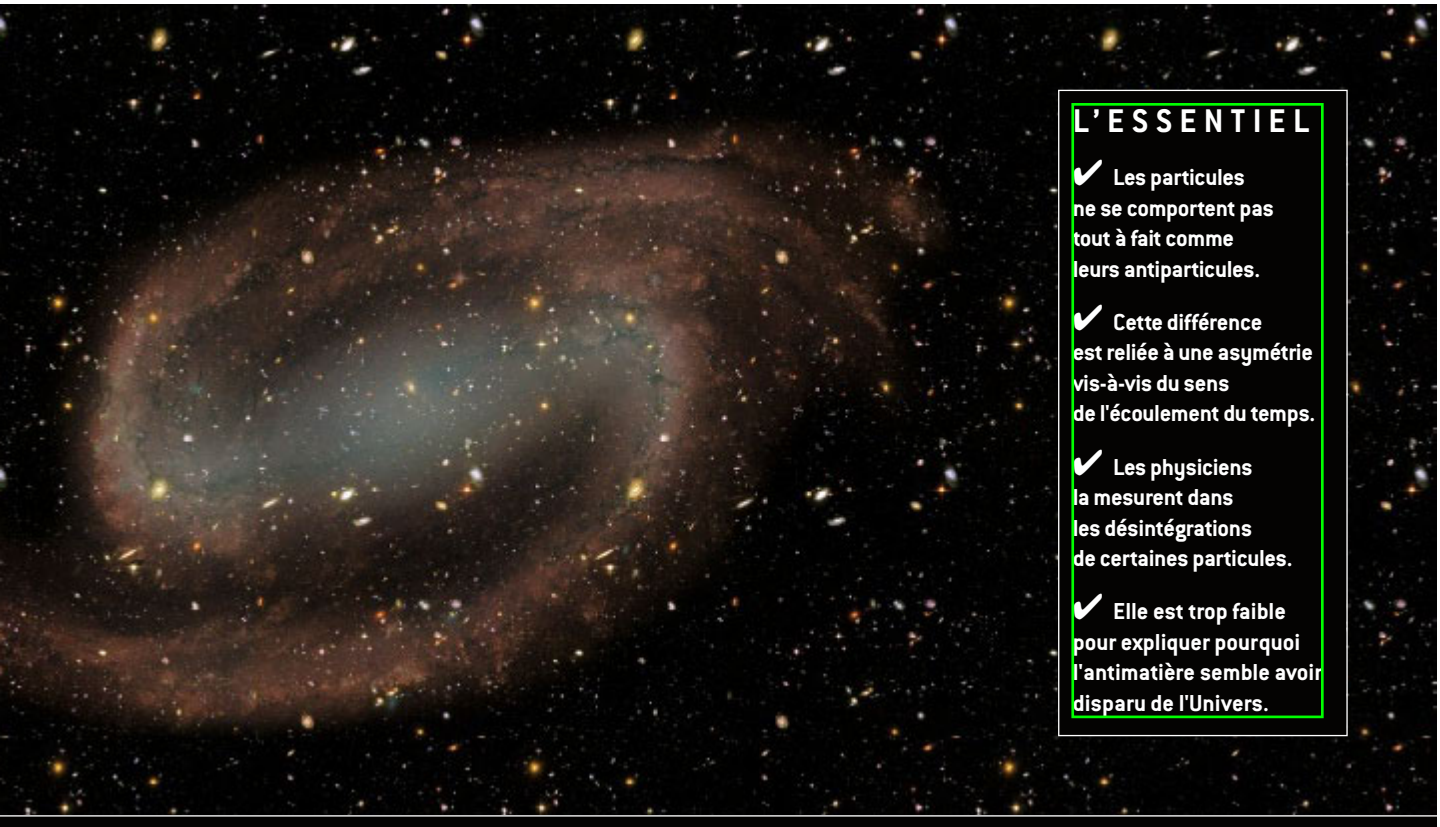
Pour autant, la description théorique obtenue aujourd'hui est incapable d'expliquer le déséquilibre extrême constaté dans l'Univers entre matière et antimatière. Or, comme nous allons le voir, ce déséquilibre a un rapport direct, mais énigmatique, avec l'écoulement du temps…

Le modèle standard est conçu pour rendre compte des interactions des particules élémentaires, telles que les physiciens les constatent dans les accélérateurs. L'un de ses principes essentiels est de respecter des symétries. On nomme ainsi des transformations mathématiques passant d'une description des particules à une autre et qui laissent invariante la forme des équations.

Lorsque les mesures confirment qu'une telle invariance est respectée, les physiciens disent que la symétrie est conservée. Sinon, ils la disent violée. Or la symétrie qui permet de passer d'un processus mettant en jeu des particules au processus analogue mettant en jeu leurs antiparticules se révèle violée. Expliquons cela.

L'idée que les lois de la physique doivent rester invariantes sous certaines trans-

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team, Pour la Science

L'ESSENTIEL

- ✔ Les particules ne se comportent pas tout à fait comme leurs antiparticules.
- ✔ Cette différence est reliée à une asymétrie vis-à-vis du sens de l'écoulement du temps.
- ✔ Les physiciens la mesurent dans les désintégrations de certaines particules.
- ✔ Elle est trop faible pour expliquer pourquoi l'antimatière semble avoir disparu de l'Univers.

tion de la symétrie CP

formations est ancienne. C'est au début du XX^{e} siècle que les principales étapes ont été franchies vers la compréhension de l'importance cruciale que jouent les symétries dans la construction des théories physiques. Il est apparu que les transformations entre les descriptions différentes d'un système physique (par exemple un ensemble de particules) forment des ensembles mathématiques nommés groupes.

Une asymétrie discrète

Par exemple, au groupe des translations dans l'espace est associée l'invariance des équations de la physique par translation du référentiel (on déplace le système de coordonnées) ; cette invariance se traduit par la conservation de la quantité de mouvement du système considéré. De même, l'invariance des lois physiques par rapport au groupe des translations dans le temps (consistant à décaler l'échelle de temps) se traduit par la conservation de l'énergie du système considéré.

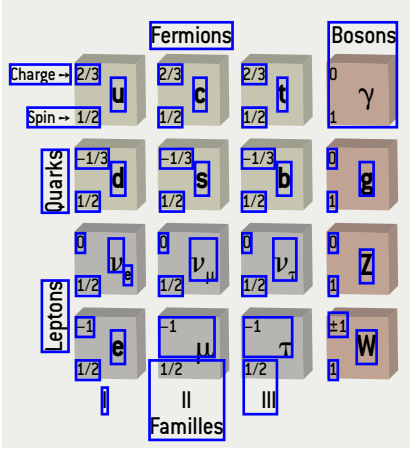
Certains groupes de transformations sont qualifiés de discrets, car ils comportent un nombre fini d'éléments : on parle alors de symétries discrètes. Ces dernières sont particulièrement utiles en physique des particules, car elles ont pour conséquence la conservation de caractéristiques désignées sous le nom de nombres quantiques (par exemple la charge électrique ou le spin, moment cinétique intrinsèque des particules). Les nombres quantiques associés aux symétries discrètes ne peuvent prendre que certaines valeurs, entières ou fractionnaires. Les symétries discrètes qui nous intéressent ici sont les symétries C, P et T, notées ainsi pour rappeler les opérations concernées.

– La première opération, C, est la transformation des particules en antiparticules, que l'on nomme aussi conjugaison de charge : si la symétrie C est respectée, les prédictions (probabilistes) relatives aux résultats d'une expérience réalisée avec des particules sont les mêmes que celles relatives à l'expérience identique où toutes les particules en jeu sont remplacées par leurs antiparticules (électrons remplacés par positrons, neutrons remplacés par antineutrons, etc.).

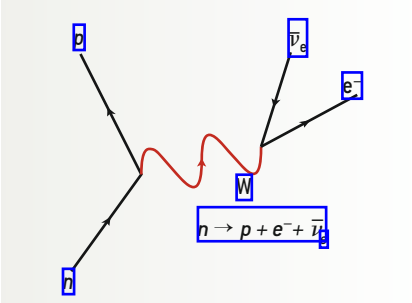
– La deuxième opération, P, est la parité, qui consiste à inverser les trois axes de coordonnées d'espace. Elle équivaut à une symétrie miroir accompagnée d'une rotation. Si la symétrie P est respectée, les résultats d'une expérience devraient être les mêmes lorsqu'on inverse les trois axes d'espace. Cela signifie que pour des

1. IL EXISTE DANS L'UNIVERS une gigantesque asymétrie entre la matière et l'antimatière : les galaxies n'ont pas d'antigalaxies associées, sortes d'images dans un miroir, comme représenté ci-dessus. La situation est totalement différente à l'échelle des particules, où cette asymétrie est minuscule et liée à celle du temps.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



2. DANS LE MODÈLE STANDARD, l'interaction électromagnétique est véhiculée par le photon (γ, de masse nulle), l'interaction forte par huit gluons (g, de masses nulles), et l'interaction faible par les bosons intermédiaires Z, W^+ et W^- (très massifs). Aux 12 constituants élémentaires (quarks et leptons), il faut ajouter les antiparticules correspondantes.



3. L'INTERACTION FAIBLE est à l'origine des désintégrations radioactives β^- et β^+. Dans une désintégration β^-, un neutron se transforme en un proton tout en libérant un électron et un antineutrino électronique *(ci-dessus)*. Dans une désintégration radioactive β^+, c'est un proton qui se transforme en neutron tandis qu'un positron et un neutrino électronique sont émis. Dans les deux cas, une particule chargée, le boson intermédiaire W^+ ou W^-, médiateur de l'interaction faible, intervient.

particules élémentaires, aller de droite à gauche devrait être aussi probable que d'aller de gauche à droite.

– La troisième opération, T, est le renversement du temps (opération consistant à changer t en $-t$) : si la symétrie T est respectée, les résultats d'une expérience sont les mêmes lorsqu'on inverse l'axe du temps. En d'autres termes, la probabilité du processus A → B est égale à celle du processus B → A ; c'est une propriété contre-intuitive, qui ne correspond pas à ce que l'on observe à l'échelle macroscopique *(voir l'article de Roger Balian)*.

La combinaison CPT de ces trois transformations joue un rôle fondamental en physique. En vertu de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, les lois de la physique doivent être les mêmes partout, à tout moment, et pour tous les observateurs en mouvement non accéléré les uns par rapport aux autres. Ce principe de relativité est nommé invariance de Lorentz. Or en 1954, le physicien Wolfgang Pauli a démontré un théorème aujourd'hui célèbre qui établit un lien entre l'invariance de Lorentz et la symétrie CPT. En simplifiant, toute théorie invariante de Lorentz respecte la symétrie CPT, et, à l'inverse, toute violation de la symétrie CPT impliquerait une violation de l'invariance de Lorentz. À ce jour, aucune expérience n'a mis en évidence une violation de la symétrie CPT ni de l'invariance de Lorentz.

Les conséquences du théorème CPT sont multiples et fondamentales : existence de l'antimatière, égalité des masses et des durées de vie des particules et des antiparticules, etc. Une conséquence qui nous concerne particulièrement ici est le fait que si la combinaison des symétries C et P – la symétrie CP – est violée, alors, d'après le théorème CPT, la symétrie T l'est aussi.

La symétrie CP

La symétrie CP est-elle respectée ? Lorsque les physiciens ont introduit mathématiquement les symétries C, P et T au cours de l'explosion scientifique des années 1930, ils les croyaient toutes respectées. Ces certitudes ont été mises à mal moins de 20 ans plus tard, lorsque l'interaction faible a commencé à révéler ses surprenantes propriétés.

Rappelons que trois forces fondamentales gouvernent les interactions des particules élémentaires. La première, la force électromagnétique, est à l'origine de l'électricité et du magnétisme. La deuxième, l'interaction forte, explique la cohésion des noyaux atomiques, composés de neutrons et de protons. La troisième, l'interaction faible, est à l'origine de nombreux processus mettant en jeu des particules élémentaires nommées leptons (l'électron en fait partie), dont un exemple majeur est la radioactivité bêta (β). Comme l'indique son nom, l'interaction faible a la plus faible intensité des trois.

C'est en 1956 que les physiciens Tsung-Dao Lee et Chen Ning Yang ont remarqué que les données expérimentales disponibles n'apportaient pas la preuve que les symétries C et P étaient conservées dans les processus mettant en jeu l'interaction faible. Se pouvait-il qu'elles ne le soient pas ? Ils ont alors souligné ce point et proposé une série d'expériences permettant de tester la conservation de la symétrie P. Début 1957, la physicienne Chien-Shiung Wu et ses collègues montrèrent qu'effectivement la symétrie P était violée dans la désintégration β du cobalt 60 :

$$^{60}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}\mathrm{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e.$$

L'électron e^- et l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ sont émis dans des directions opposées. Si l'on applique une transformation de parité P, les directions d'émission de l'électron e^- et de l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ sont échangées, mais les spins de ces particules restent identiques (P conserve les spins, mais inverse la direction de propagation d'une particule). Si la symétrie P était respectée, les électrons devraient donc être émis en quantités égales dans deux directions opposées. Or l'équipe de « Madame Wu », comme on la nommait, a constaté au contraire que presque tous les électrons sont émis dans la direction opposée à celle du spin du cobalt, et donc que la violation de la symétrie P est maximale.

Cette violation de symétrie fut confirmée la même année par l'expérience conduite par Richard Garwin, Leon Lederman et Marcel Weinrich sur la chaîne de désintégration des pions chargés, des assemblages quark-antiquark *(voir l'encadré page ci-contre)*. Cette expérience impliquait la violation de la symétrie P, mais aussi celle de la symétrie C.

Ainsi, les physiciens durent admettre que les symétries C et P sont violées. Mais ils restèrent accrochés à l'idée que le monde des particules était symétrique sous l'effet de la combinaison CP (conjugaison des charges accompagnée d'une transformation de parité).

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Ils se trompaient. La violation de la symétrie CP fut découverte pour la première fois en 1964 dans le système des kaons – d'autres assemblages quark-antiquark que les pions – par James Cronin, Val Fitch, James Christenson et René Turlay. Même si elle était minime – de seulement 0,2 pour cent –, la précision de la mesure la rendait certaine. Ce fut un choc chez les physiciens ! Et en vertu du théorème CPT, l'existence de cette violation de la symétrie CP impliquait celle de la violation de la symétrie T par renversement du temps.

La symétrie T violée

Ainsi, alors qu'il avait semblé naturel aux physiciens de postuler qu'à l'échelle microscopique les processus sont réversibles, il fallait admettre que ce n'était pas toujours le cas : l'observateur d'un « film » montrant l'évolution à cette échelle des particules élémentaires noterait une toute petite différence si ce même film était visionné à rebours…

La confirmation expérimentale directe de cette violation de la symétrie T ne sera acquise qu'en 1998 par la collaboration CPLEAR du CERN, à nouveau par le biais des kaons. La mesure consistait à compter les désintégrations des kaons et des antikaons en, respectivement un électron, un pion et un antineutrino, ou un positron, un pion et un neutrino ; elle a révélé une asymétrie entre les probabilités de ces deux désintégrations. L'équipe CPLEAR a ainsi montré que les transformations des antikaons en kaons sont plus fréquentes que celles des kaons en antikaons – le processus symétrique par renversement du temps. C'est là une manifestation directe de la violation de T. Cet exemple illustre à quel point les symétries C, P et T sont intimement liées, la différence de comportement entre matière et antimatière étant liée à la flèche du temps microscopique…

D'où proviennent les violations de la symétrie CP ? Une structure du modèle standard, la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, les relie à l'existence de trois familles de quarks. Détaillons un peu.

On connaît aujourd'hui six natures différentes de quarks – les physiciens parlent de saveurs différentes –, que l'on organise en trois couples nommés familles. La première famille est constituée par les quarks u (ou « up ») et d (ou « down »), tandis que la deuxième comprend les quarks c (pour « charme ») et s («strange» ou « étrange ») et la troisième les quarks t (« top ») et b (« beau ») ; u, c, t ont pour charge électrique 2/3 (l'unité étant la charge du proton), et d, s, b ont pour charge électrique –1/3 *(voir la figure 2)*.

En 1963, cherchant à rendre compte de certaines désintégrations, le physicien Nicola Cabibbo introduisit l'idée que, pour les quarks, les états quantiques de masse (les états de quarks qui se créent, se propagent, se désintègrent) ne sont pas les mêmes que les états quantiques de saveur (les états de quarks qui participent à l'interaction faible). Pour cette raison, les états de masse des quarks doivent être considérés comme des mélanges de saveurs.

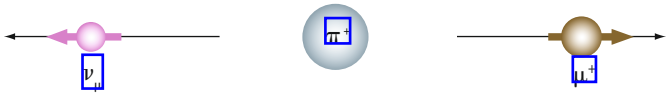
L'interaction faible relie ainsi les quarks des différentes familles. Elle le fait par l'intermédiaire de deux de ses trois particules médiatrices : les bosons chargés W^+ et W^-. C'est ce transport de l'interaction faible par les bosons $W^\pm$ qui est à l'origine du mélange des mésons neutres tels que les kaons neutres (composés d'un quark d et d'un antiquark $\bar{s}$) ou les mésons B neutres

L'AUTEUR

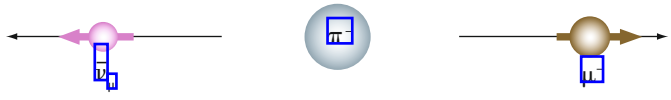
Marie-Hélène SCHUNE, physicienne au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (Université Paris-Sud/IN2P3/CNRS), participe à l'expérience LHCb du CERN axée sur la physique des mésons B ; elle y dépouille et analyse les données.

SYMÉTRIE CP ET DÉSINTÉGRATIONS DES PIONS

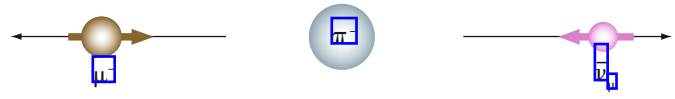
Les pions sont les plus légers des mésons (assemblages du type quark-antiquark). Le pion neutre π^0 mélange des assemblages $u\bar{u}$ et $d\bar{d}$, (u et d sont des quarks, la barre désigne l'antiparticule). On s'intéresse ici aux pions chargés. Le pion π^+ est un assemblage $u\bar{d}$, tandis que le pion π^-, son antiparticule, est un assemblage $\bar{u}d$. Les pions ont un spin nul. Le spin, rappelons-le, est un moment cinétique intrinsèque, qui n'apparaît qu'en physique quantique. La valeur nulle du spin du π^+ joue un grand rôle dans sa désintégration.



En effet, par conservation du moment cinétique total, il faut que le moment cinétique du système formé par le muon (μ^+) et le neutrino muonique (ν_μ) sortants soit nul. Comme les spins de ces derniers valent 1/2, on voit bien qu'il faut que leurs projections sur les directions de ces particules *(flèches noires)* soient opposées *(flèches rose et marron)*. Appliquons maintenant la transformation de conjugaison de charges C, c'est-à-dire répétons l'expérience avec l'antiparticule π^-. On obtiendrait :



Toutefois, ce processus n'est pas observé. En revanche, on obtient un processus observé dans la réalité si l'on applique en plus de C l'opération de parité P, ce qui, dans le cas considéré ici, implique d'inverser les positions des particules sortantes, mais pas le sens de leurs spins (le spin étant un moment cinétique intrinsèque quantique, il ne change pas de sens lors d'une inversion des trois axes de coordonnées, comme le moment cinétique ordinaire) :



© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

(formés d'un quark d et d'un antiquark $\overline{b}$). On parle d'oscillations $K^0 \leftrightarrow \overline{K}^0$ et $B^0 \leftrightarrow \overline{B}^0$.

De façon plus générale, on représente mathématiquement le mélange de saveurs sous la forme d'une matrice, un tableau de 3×3 nombres *a priori* complexes. Notée V_{CKM}, sa fonction est de faire passer les représentants mathématiques des quarks dans l'espace des états quantiques de masse à l'espace des états quantiques de saveur. V_{CKM} doit satisfaire à une condition dite d'unitarité, qui traduit le fait que l'on se cantonne aux transitions entre quarks à l'intérieur des trois familles connues du modèle standard. Cela limite le nombre de ses paramètres indépendants, de sorte que les 18 paramètres réels de la matrice V_{CKM} se réduisent à quatre paramètres inconnus seulement.

La matrice V_{CKM} porte le nom de matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa en l'honneur de N. Cabibbo et des physiciens Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa qui, en 1973, ont proposé une explication de la violation de la symétrie CP dans le cadre de la théorie de l'interaction faible. Ils ont montré que la violation de CP équivaut à la présence d'un coefficient complexe à partie imaginaire non nulle dans la matrice de mélange des saveurs de quarks.

En 1973, seules deux familles de quarks étaient connues. Or on peut montrer que s'il n'y a que deux familles de quarks, la matrice de mélange à deux dimensions correspondante ne comporte que des éléments réels, ce qui empêche la théorie de décrire une violation de CP.

Pour résoudre cette difficulté, M. Kobayashi et T. Maskawa ont postulé l'existence d'une troisième famille de quarks, ce qui fut confirmé expérimentalement quelques années plus tard. Le schéma CKM est alors devenu une composante essentielle du modèle standard de la physique des particules. La violation de la symétrie CP y apparaît comme une possibilité offerte par la présence de six saveurs de quarks organisées en trois familles.

Si l'on considère la transition d'un quark b vers un quark u *via* l'interaction faible, le premier élément de la troisième colonne de la matrice V_{CKM}, noté V_{ub}, est mis en jeu. Si au lieu de considérer le cas des particules, on se penche sur les antiparticules, la transition de l'antiquark $\overline{b}$ vers un antiquark $\overline{u}$ met en jeu l'élément complexe conjugué V^*_{ub}. Comme l'élément V^*_{ub} est différent de V_{ub} (puisque qu'il s'agit d'un nombre complexe), la transformation $\overline{b} \rightarrow \overline{u}$ aura des caractéristiques différentes.

Les choses sont en fait un peu plus compliquées, cette différence ne se manifestant dans les résultats que si le processus mettant en jeu la transition $b \rightarrow u$ peut se produire de deux façons différentes *(voir l'encadré page 69)*. C'est pourquoi on peut par exemple étudier les désintégrations du méson B^- $(b\overline{u}) \rightarrow K^- + \pi^0$ et celle du méson B^+ $(\overline{b}u) \rightarrow K^+ + \pi^0$. La comparaison des probabilités de ces désintégrations permet de déterminer la troisième colonne de la matrice V_{CKM} et d'évaluer l'accord entre le modèle standard et les mesures expérimentales.

De nombreux tests similaires à celui décrit ci-dessus ont été réalisés de façon extrêmement détaillée par deux équipes internationales au cours des dix dernières années. L'expérience BELLE a été réalisée à l'Accélérateur des hautes énergies de Tsukuba (K2K), au Japon, tandis que BABAR l'a été aux États-Unis à l'Accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC). Afin de mesurer la violation de la symétrie CP, environ deux milliards de mésons B ont été produits, puis des désintégrations très rares (pour certaines, les mésons B avaient moins d'une chance sur un million de se désintégrer de cette façon) ont été étudiées.

LA VIOLATION DE LA SYMÉTRIE CP EST DÉCRITE

par un paramètre du modèle standard de la physique des particules et est liée à l'existence de trois familles de quarks.

Un seul paramètre décrit la violation

La violation de la symétrie CP dans le système des mésons B a ainsi été clairement mise en évidence, avec des taux de violation parfois supérieurs à dix pour cent dans certaines désintégrations. Par ailleurs, l'ensemble des résultats montre que l'ajustement des quatre paramètres de la matrice V_{CKM} suffit à rendre compte de façon satisfaisante des résultats expérimentaux. En d'autres termes, le modèle standard, une fois de plus, triomphe.

Ainsi, il semble bien que dans le cadre du modèle standard, un seul paramètre – la partie imaginaire d'un élément de la matrice V_{CKM} – rende compte de la viola-

BIBLIOGRAPHIE

M. S. Sozzi, **Discrete Symmetries and CP violation**, Oxford University Press, 2008.

M.-A. Bouchiat et D. Lhuillier, **Les particules au crible de l'asymétrie miroir**, *Pour la Science*, n° 362, décembre 2007.

SUR LE WEB

http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/

http://www.dailymotion.com/video/x6vc8a_14-marie-helene-schune-lhc-collisio tech

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

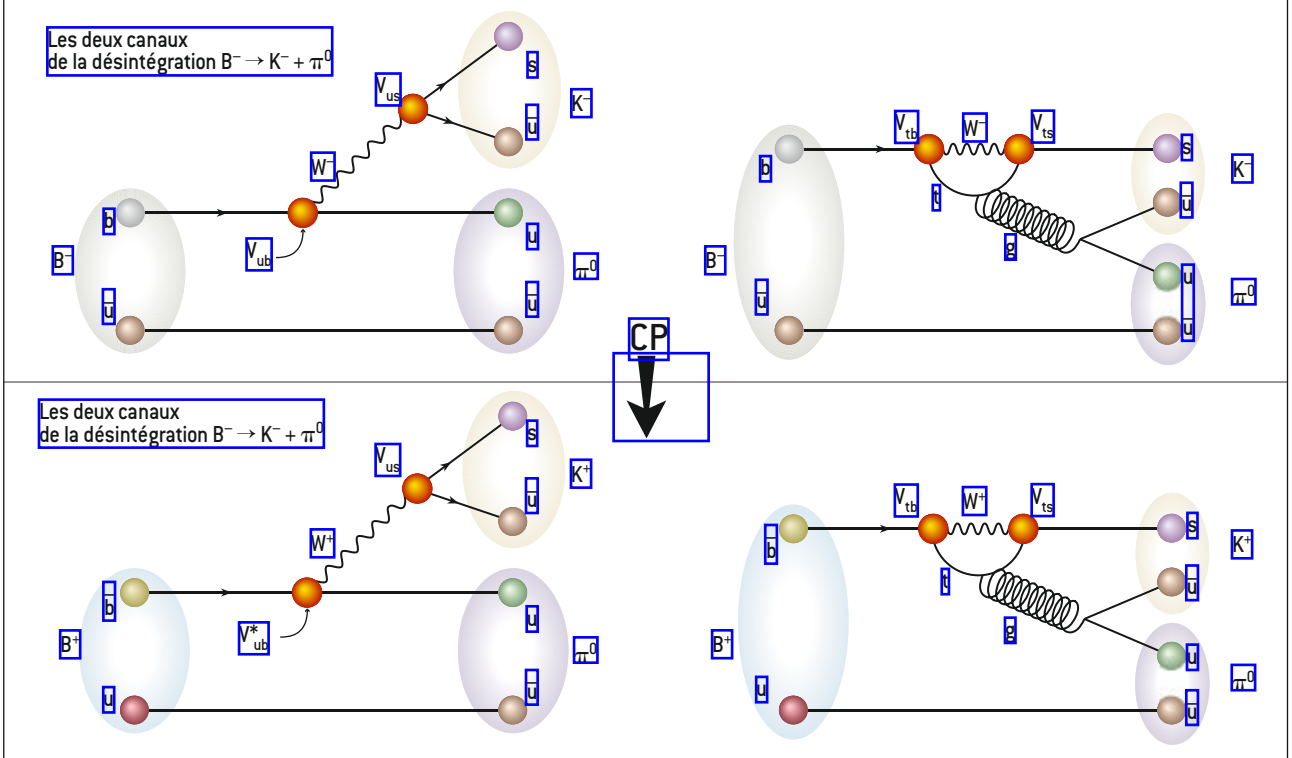
tion de CP. Mais les physiciens voudraient en être plus sûrs. C'est pourquoi l'un des grands axes de la recherche actuelle en physique des particules est l'étude précise de nombreux modes mettant en jeu différents types de quarks afin de vérifier la validité de ce résultat.

Entamées par les expériences BELLE et BABAR, ces études vont se poursuivre avec encore plus de précision et en explorant les désintégrations d'autres mésons B dans le cadre de l'expérience LHCb, qui a démarré à la fin de 2009 au LHC, le grand collisionneur proton-proton dans le tunnel du CERN. Cette expérience est capable de sélectionner certaines désintégrations des mésons B parmi l'énorme lot produit chaque année (environ 1 000 milliards de mésons B). Au cours de l'été 2010, environ 125 millions de mésons B ont déjà été produits et leurs désintégrations sont en cours d'analyse. L'extrême précision attendue pour ces mesures pourrait révéler des signes de phénomènes physiques inédits, non décrits par le modèle standard, par exemple dans le domaine de la violation de CP.

Ce qui précède concerne le secteur des mésons, c'est-à-dire des assemblages quark-antiquark prévus par le modèle standard. Qu'en est-il du secteur des baryons, c'est-à-dire des assemblages de trois quarks que ce modèle prévoit aussi ? Pourquoi les protons et les neutrons (des baryons) constituent-ils l'essentiel du contenu apparent de l'Univers, alors que les antiprotons et les antineutrons (antibaryons) sont rarissimes ? C'est l'énigme de la baryogenèse. Ni les résultats de BELLE, ni ceux de BABAR, ni tout ce que nous avons compris jusqu'à présent sur l'origine de la violation de la symétrie CP ne suffisent à l'expliquer.

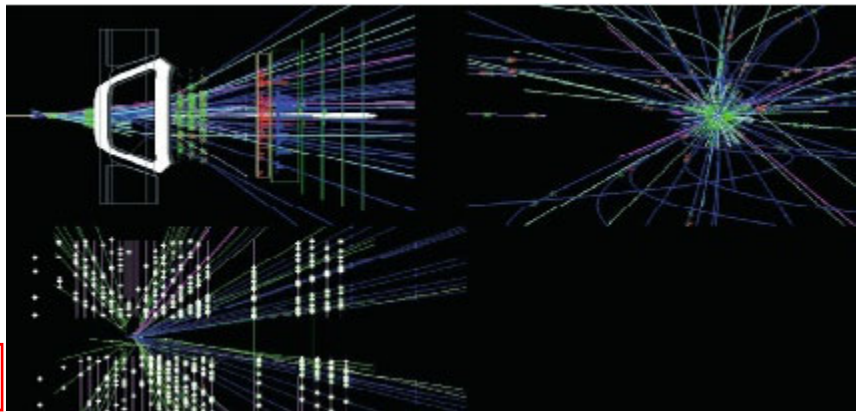
Afin de mieux percevoir l'étendue de ce problème, rappelons quelques éléments essentiels de l'histoire de la découverte de l'antimatière. Sa « naissance », purement théorique, a lieu en 1928. Cherchant à mettre au point un formalisme quantique compatible avec la théorie de la relativité restreinte pour décrire l'électron, le physicien Paul Dirac obtient une équation dont la résolution met en évidence deux fois plus de solutions

LA VIOLATION CP, UNE AFFAIRE D'INTERFÉRENCES



Un processus de désintégration à deux canaux (ou voies possibles) est nécessaire pour faire apparaître la violation de la symétrie CP prédite par le schéma CKM du modèle standard. C'est le cas de la désintégration des mésons B^+ et B^-. La violation de CP se traduit par une différence entre la probabilité des désintégrations $B^- \to \pi^0 + K^-$ et celle des désintégrations $B^+ \to \pi^0 + K^+$. Les deux canaux du processus $B^- \to \pi^0 + K^-$ *(en haut)* et de son image par la transformation CP, le processus $B^+ \to \pi^0 + K^+$ *(en bas)*, sont représentés ici en termes des quarks. Le nombre complexe V_{ub}, seul élément de la matrice CKM qui n'est pas un nombre réel, intervient dans le calcul de la contribution du premier canal du processus $B^- \to \pi^0 + K^-$; il est associé à la transformation du quark *b* en quark *u*. Son complexe conjugué V^*_{ub} intervient dans le premier canal du processus $B^+ \to \pi^0 + K^+$ (les autres éléments V_{tb}, V_{ts}, V_{us} sont réels). Comme la probabilité de chaque processus s'obtient en additionnant les contributions des deux canaux et en prenant le carré du module de cette somme, une différence directement liée à la nature complexe de V_{ub} apparaît dans le calcul de la différence entre la probabilité de $B^- \to \pi^0 + K^-$ et celle de $B^+ \to \pi^0 + K^+$. La comparaison des deux processsus s'apparente à un phénomène d'interférences.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



4. LE LHC produit des milliards de mésons B au cours de collisions de paquets de protons. Enregistré le 21 avril 2010, l'événement représenté ici est le premier pour lequel un méson B^+, composé d'un antiquark $\bar{b}$ et d'un quark *u*, a été reconstruit. La durée de vie du B^+ est très brève ($1{,}5 \times 10^{-12}$ seconde) et on ne le détecte que *via* les empreintes de ses produits de désintégration dans le détecteur LHCb. On voit sur la figure environ une centaine de traces chargées, dont trois seulement sont issues de B^+, les autres étant dues aux restes de la collision. Cinq mois plus tard, des milliards de paires de quarks $b\,\bar{b}$ ont été produites au LHCb et des centaines de mésons B chargés ont été reconstruits par les physiciens de cette expérience.

qu'attendu : outre une solution correspondant à l'électron, il en existe une autre associée à une énergie négative. Dirac suppose alors que cette solution d'énergie négative correspond à une particule de charge opposée, sorte d'image dans un miroir de l'électron. C'est elle que nous nommons aujourd'hui positron, antiparticule de l'électron mise en évidence en 1932 par Carl Anderson dans une chambre à brouillard traversée par des rayons cosmiques.

Présente en très faible quantité dans les rayons cosmiques, l'antimatière peut aussi être produite (en quantité égale à la matière) grâce aux accélérateurs de particules. Mises en contact, la matière et l'antimatière s'annihilent en libérant de l'énergie (des photons). L'inverse fonctionne aussi, et à partir d'énergie on peut créer à parts égales des particules de matière et d'antimatière.

Il semble que lors du Big Bang, l'Univers n'était constitué que d'énergie, à partir de laquelle autant de matière que d'antimatière a été créée. Mais un mécanisme inconnu a très légèrement favorisé la matière, au détriment de l'antimatière, laquelle est devenue marginale dans l'Univers connu (rares antiprotons présents dans les rayons cosmiques, positrons créés dans certaines désintégrations β, jets de positrons émis par certains trous noirs...).

L'antimatière est ainsi en quantité négligeable à l'échelle de l'Univers. Cela pose une difficulté de taille. Des mesures qui comparent les nombres de photons et de particules de matière présents indiquent qu'il a dû y avoir peu après le Big Bang un très léger déséquilibre : pour 10 000 000 000 particules d'antimatière, on devait trouver 10 000 000 001 particules d'antimatière… Les 10 000 000 000 paires particule-antiparticule se seraient annihilées et le petit, tout petit excès de matière, est finalement resté… et ce tout petit excès, c'est nous !

L'asymétrie cosmique reste inexpliquée

L'origine de ce déséquilibre n'est pas comprise ; toutefois, le physicien soviétique Andreï Sakharov a formulé en 1967 les trois conditions nécessaires pour qu'une asymétrie entre matière et antimatière puisse émerger à l'échelle de l'Univers à partir d'une situation symétrique.

La première condition est que les interactions de la matière et de l'antimatière soient asymétriques, en d'autres termes que certaines interactions violent les symétries C et CP (donc T).

Une deuxième condition est l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre baryonique, c'est-à-dire tels que le nombre de baryons et le nombre d'antibaryons créés par ces processus soient différents.

La troisième condition est qu'il y ait rupture de l'équilibre thermique. En effet, à l'équilibre thermique, les taux des réactions créant des baryons sont égaux à ceux des processus créant des antibaryons, et il n'y a pas d'asymétrie.

Comme nous l'avons vu, le modèle standard de la physique des particules intègre une violation de CP, mais cette dernière est bien trop petite pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. À ce propos, le taux de violation de CP mesuré dans la physique des mésons B (parfois de l'ordre de dix pour cent) ne peut pas être comparé directement au léger déséquilibre entre matière et antimatière évoqué : si l'on fait l'hypothèse que la violation de CP ne trouve son explication que dans le cadre du modèle standard, les calculs montrent que l'asymétrie obtenue est un grand nombre d'ordres de grandeur inférieur au léger déséquilibre entre matière et antimatière à l'époque du Big Bang...

Parmi les pistes alternatives, on évoque diverses extensions du modèle standard, avec par exemple la création d'une asymétrie initiale entre leptons et antileptons convertie par la suite en asymétrie entre baryons et antibaryons...

Pour passer de la découverte de l'antimatière dans la première moitié du XX^{e} siècle aux mesures ultraprécises des différences de comportement entre matière et antimatière dans les mésons B au début du XXI^{e} siècle, les physiciens ont accumulé plus de 70 ans de progrès théoriques et expérimentaux, durant lesquels ils ont souvent dû, après avoir été surpris, abandonner leurs idées préconçues. Au stade actuel de cette quête, une énigme centrale persiste : si le modèle standard de la physique des particules peut rendre compte des violations de la symétrie CP observées dans le secteur des mésons, il est incapable d'expliquer pourquoi notre Univers semble dépourvu ou presque d'antimatière.

Tout un pan de la réalité physique nous échappe donc, et relève de ce que nous nommons dans notre jargon la « physique au-delà du modèle standard ». Cette « nouvelle physique » fait l'objet de recherches actives, en particulier à l'aide du grand collisionneur proton-proton du CERN, le LHC.

Quoi qu'il en soit, nous savons déjà grâce au théorème CPT que la conséquence directe de la violation de la symétrie CP est celle de T, qui, elle aussi, est observée expérimentalement. L'asymétrie matière-antimatière, si ténue en physique des particules et si massive dans l'Univers, semble décidément liée à la question de la flèche du temps.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Parlons-en !

Les grands débats

proposés par le **CNRS**, en partenariat avec
le **musée du quai Branly** et la **mairie de Paris**

Biologie synthétique : a-t-on le droit de fabriquer le vivant ?

Jeudi 28 octobre 2010 à 19 heures

Salon de lecture Jacques Kerchache, musée du quai Branly

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

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

SCIENCES SUR SEINE 2010

© CNRS - conception graphique Sarah Landel, adaptation Morwenna Meal

cnrs
www.cnrs.fr

musée du quai Branly

MAIRIE DE PARIS

CCIN2P3

20 minutes.fr

france inter

POUR LA SCIENCE

MESURER LE TEMPS

Les dernières horloges atomiques mesurent le temps avec une erreur inférieure à une seconde pour trois milliards d'années. En orbite dès 2013, l'horloge atomique PHARAO testera la théorie de la relativité et la dérive éventuelle des constantes fondamentales de la physique.

Christophe Salomon

En soulevant avec un cric la dernière née des horloges atomiques, des physiciens américains du Colorado ont montré qu'il était possible de détecter un effet de la relativité générale – le décalage des horloges en fonction de l'altitude – dès 30 centimètres de hauteur. Pendant ce temps, en Europe, le modèle de vol de l'horloge spatiale PHARAO est en cours d'assemblage ; il vise à tester la relativité générale au millionième près avec des atomes ultrafroids à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Quel est le lien entre ces deux expériences ? À quoi servent les horloges atomiques ? Quels sont leurs enjeux ? Pour le comprendre, revenons quelques millénaires en arrière.

La quête de la précision

Depuis l'Antiquité, les hommes ont cherché à mesurer le temps ou, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la Terre autour du Soleil, celle de la Lune autour de la Terre ou encore celle de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre la découverte de l'isochronisme du pendule par Galilée, au début des années 1600, et sa mise en pratique par le physicien néerlandais Christiaan Huygens quelques décennies plus tard, pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour.

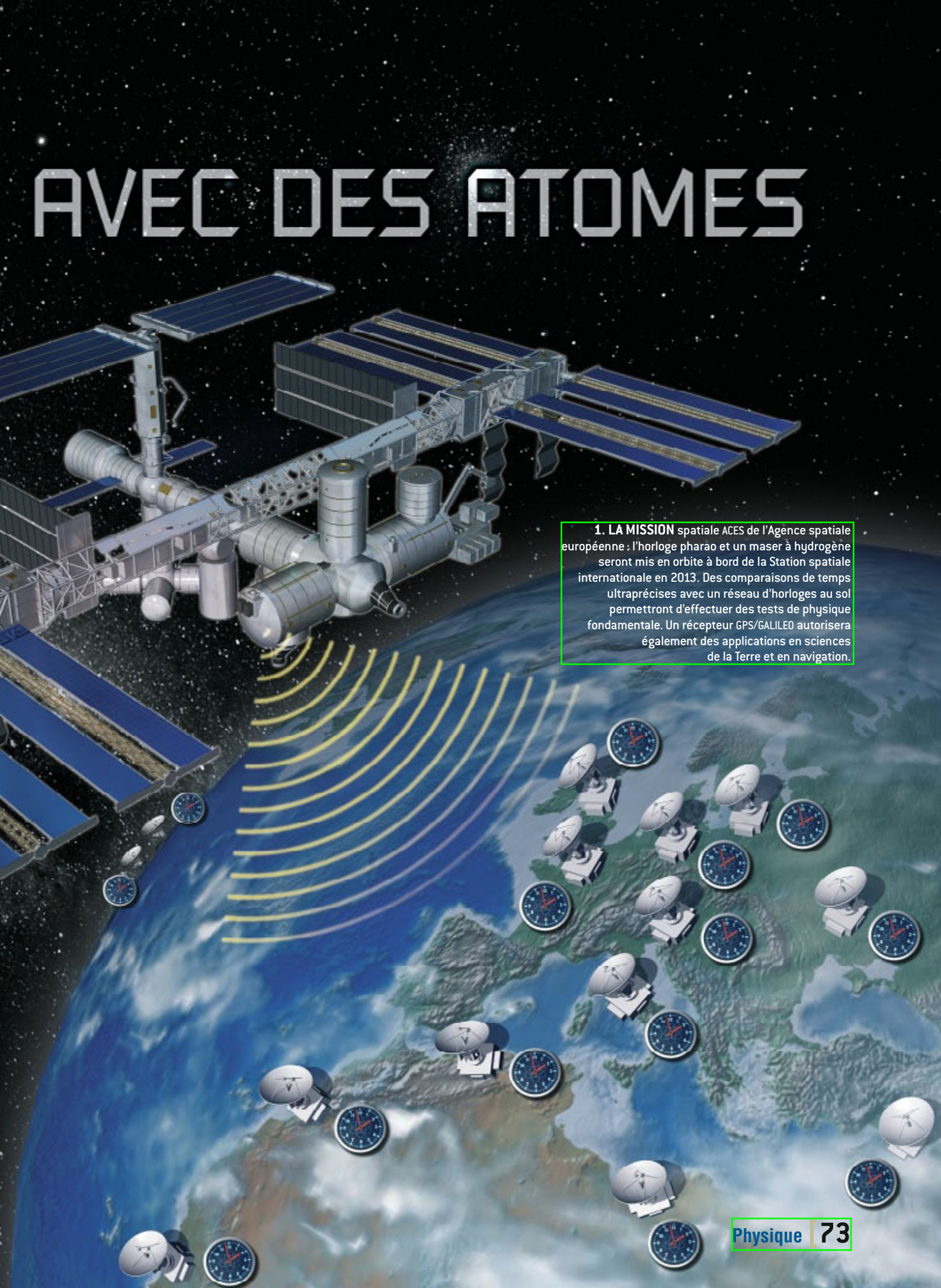
Galilée a observé que les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement

L'ESSENTIEL

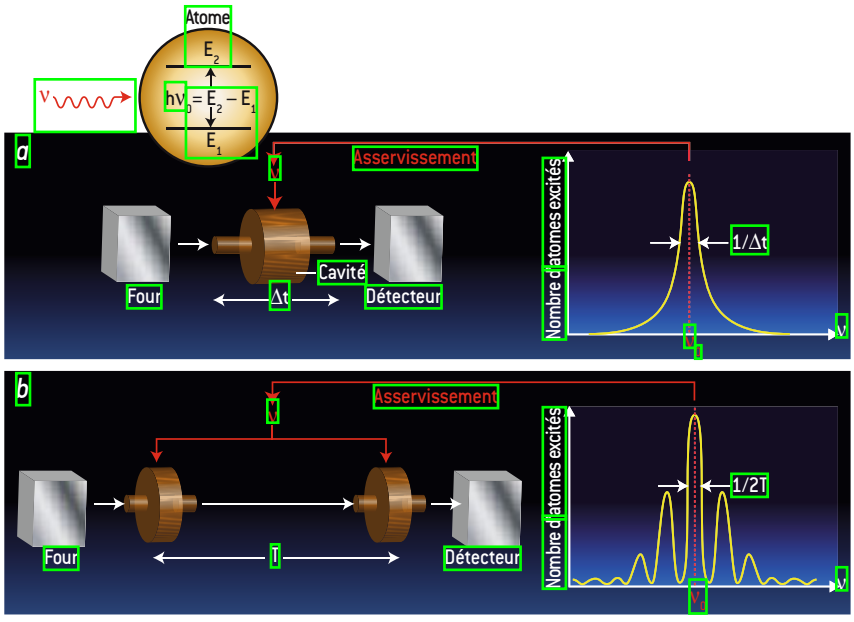
- ✔ Une horloge est un système qui oscille de façon régulière.
- ✔ Dans une horloge atomique, ces oscillations sont celles du champ électromagnétique produit par un oscillateur à quartz, un maser ou un laser.
- ✔ Pour éviter toute dérive, la fréquence de ce champ est verrouillée sur une fréquence caractéristique d'un atome.
- ✔ Bientôt envoyée dans l'espace, une telle horloge testera la théorie de la relativité et la stabilité des constantes fondamentales de la physique.

Bruno Bourgeois

AVEC DES ATOMES



1. LA MISSION spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne : l'horloge pharao et un maser à hydrogène seront mis en orbite à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Des comparaisons de temps ultraprécises avec un réseau d'horloges au sol permettront d'effectuer des tests de physique fondamentale. Un récepteur GPS/GALILEO autorisera également des applications en sciences de la Terre et en navigation.



2. PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE : une onde électromagnétique de fréquence ν excite un ensemble d'atomes de césium de l'état d'énergie $\mathcal{E}_1$ à l'état d'énergie $\mathcal{E}_2$. Issus d'un four, les atomes forment un jet qui traverse une cavité où l'onde est appliquée. Le détecteur compte le nombre d'atomes portés dans l'état excité. Lorsqu'on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0, le nombre d'atomes excités fournit une courbe en cloche dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d'interaction Δt de l'onde et des atomes. Un asservissement électronique permet de verrouiller la fréquence du rayonnement sur la fréquence de l'atome *(a)* ; une variante consiste à séparer l'onde appliquée en deux parties *(b)*. Les atomes subissent deux interactions successives séparées d'un intervalle de temps T. Il en résulte un phénomène d'interférences qui produit des franges de largeur $1/2T$. Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l'horloge.

régulières, c'est-à-dire périodiques. En comptant le nombre d'oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné, et plus précise sera la mesure.

La période T du pendule ne dépend que d'un petit nombre de paramètres, la longueur du fil l et l'accélération de la pesanteur g : $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$. Cette formule simple montre les limites du dispositif : si la longueur du fil change, à cause de la température par exemple, l'horloge perdra sa précision ; il en est de même si l'accélération de la pesanteur change (par exemple si l'on prend de l'altitude).

Poussés par les enjeux de la navigation transocéanique et la détermination de la longitude, mais aussi par les sommes promises par les souverains des deux siècles suivants, les pendules, montres mécaniques et chronomètres n'ont cessé de s'améliorer. Combattant l'influence néfaste des changements de température et d'humidité sur le fonctionnement de ses chronomètres, l'horloger britannique John Harrison finit par produire en 1759, après 40 années d'efforts, un instrument qui présentait une erreur inférieure à un dixième de seconde par jour. Son chronomètre, qui alliait une mécanique de précision à un choix astucieux de métaux, fut testé en mer par un navire britannique qui fit l'aller-retour Portsmouth-les Antilles en un peu moins de trois mois. Au retour, le chronomètre embarqué avait moins de cinq secondes d'écart avec ceux restés au sol. Harrison reçut pour cet exploit un prix de 40 000 livres, une somme considérable pour l'époque !

La percée scientifique suivante fut l'invention de l'oscillateur à quartz en 1918. Le système périodique n'est plus un système mécanique, mais un champ électromagnétique oscillant reposant sur les propriétés piézo-électriques du quartz. La vibration mécanique du cristal de quartz produit un champ électrique oscillant à une fréquence bien définie et bien plus élevée que celle du pendule (quelques millions d'oscillations par seconde). Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi le monde moderne et constituent une base de temps suffisamment stable pour la plupart des applications courantes.

Cependant, comme le pendule, mais à un degré bien moindre, l'oscillateur à quartz présente des dérives en température. Pour domestiquer ces oscillateurs, les physiciens ont eu l'idée de réaliser une horloge atomique qui combine les propriétés de l'oscillateur à quartz et celles de l'atome. L'énergie d'un atome est quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, déterminées par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie correspondant à ces valeurs ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New York ou à Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz, difficiles à réaliser à l'identique. L'idée est donc d'empêcher la dérive de l'oscillateur à quartz en verrouillant – en asservissant – la fréquence de ses oscillations sur une fréquence caractéristique de l'atome, correspondant à la différence entre deux niveaux d'énergie particuliers.

Pour ce faire, on envoie un jet d'atomes dans une cavité soumise au champ électromagnétique produit par l'oscillateur à quartz. Les deux niveaux d'énergie atomiques considérés sont E_1 (fondamental) et E_2 (excité), séparés par une énergie $h\nu_0$, où ν_0 est une fréquence et h la constante de Planck. Avant leur passage, les atomes sont dans l'état d'énergie E_1 ; lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique appliquée à la cavité est proche de ν_0, les atomes sont portés dans l'état excité E_2. Un détecteur compte le nombre d'atomes excités quand on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 : on obtient une courbe en cloche – dite courbe de résonance – centrée sur ν_0 dont la largeur est inversement proportionnelle à la durée d'interaction de l'onde et des atomes. Par rétroaction, un montage électronique verrouille la fréquence de l'onde sur la fréquence ν_0 de l'atome : le montage électronique vérifie en permanence que la fréquence de l'oscillateur à quartz est très proche de ν_0 et la corrige si elle s'éloigne de cette valeur *(voir la figure 2a)*.

Horloges à césium : atomes chauds, atomes froids

La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Louis Essen et Jack Parry en 1955 fonctionnait sur ce principe, amélioré grâce à une méthode proposée par le physicien américain Norman Ramsey (qui lui vaudra le prix Nobel en 1989) : l'onde électromagnétique produite par l'oscillateur à quartz est divisée en deux parties, qui interagissent chacune avec les atomes sur leur parcours. Cette double interaction entraîne des interférences qui affinent d'autant plus le signal transmis

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

par le détecteur que l'intervalle de temps entre les deux interactions est grand *(voir la figure 2b)*. L'erreur journalière de cette première horloge à césium n'était ainsi que de 0,000 01 seconde, bien plus faible que l'erreur d'un quartz ou des meilleurs systèmes mécaniques.

La 13e Conférence générale des poids et mesures de 1967 choisit ainsi l'atome de césium pour donner la définition actuelle de la seconde du système international d'unités : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état électronique fondamental du césium 133. » Depuis cette époque, plusieurs milliers d'horloges à césium commerciales ont été produites pour de nombreuses applications, dont le système de géolocalisation par satellite GPS.

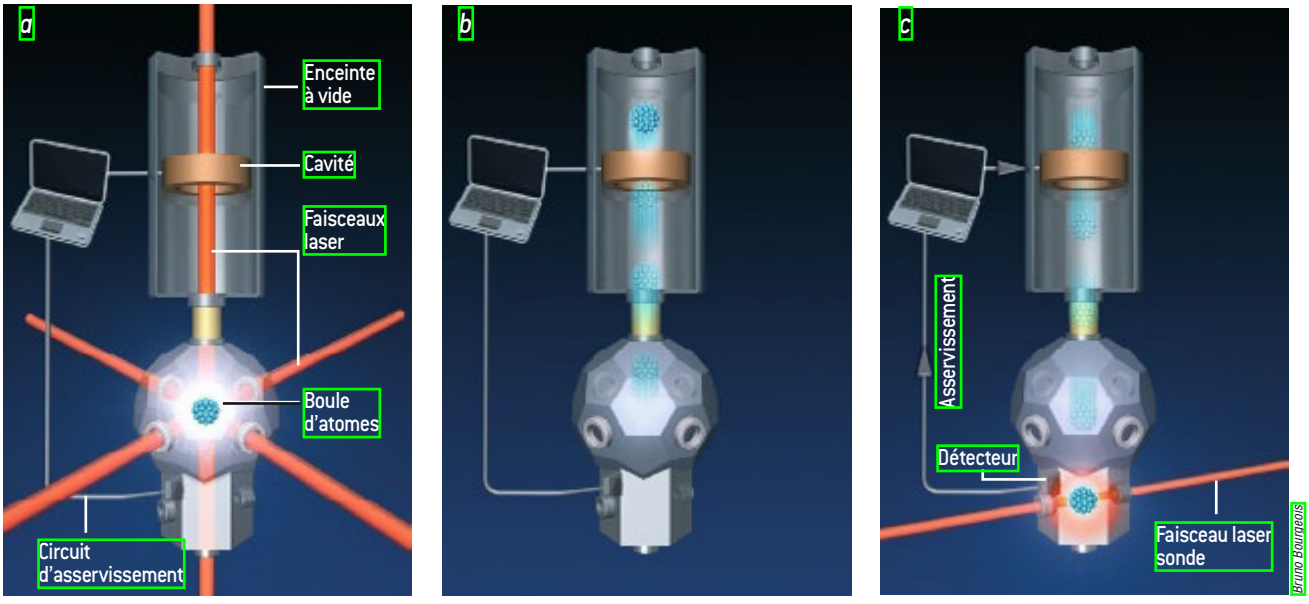
Au début des années 1990, les atomes refroidis par laser ont permis d'augmenter encore la précision des horloges à césium de deux ordres de grandeur. En effet, à une température de un millionième de degré au dessus du zéro absolu, les atomes de césium ont une vitesse d'agitation de seulement sept millimètres par seconde, soit 30 000 fois plus lente qu'à température ambiante. Ils peuvent alors être utilisés en fontaine atomique, c'est-à-dire être projetés en l'air à la verticale à travers la cavité soumise à l'onde excitatrice, et retomber par le même chemin *(voir la figure 3)*. Par cette méthode, on obtient un intervalle de temps entre les deux interactions avec l'onde électromagnétique excitatrice approchant une seconde – une durée 100 à 1 000 fois plus longue que dans l'horloge à jet atomique de Essen et Parry. Ces horloges présentent une erreur de dix picosecondes (10^{-12} seconde) par jour et sont aujourd'hui à la base de la réalisation du Temps atomique international (TAI), le temps de référence au niveau mondial. Aujourd'hui, une vingtaine de fontaines atomiques sont en fonctionnement dans le monde et sont régulièrement comparées entre elles pour réaliser le TAI.

L'avènement des horloges optiques

Ces deux dernières années, de nouveaux développements sur les horloges atomiques ont permis d'approcher la picoseconde d'erreur par jour, soit moins d'une seconde tous les trois milliards d'années ou encore 15 secondes sur l'âge de l'Univers ! Ces nouvelles horloges sont des horloges optiques : les atomes sont excités non plus par un champ électromagnétique de fréquence 10^{10} hertz (l'équivalent d'un pendule qui battrait à dix milliards de périodes par seconde), comme dans l'horloge à césium, mais par un champ lumineux qui oscille 100 000 fois plus vite, à 10^{15} hertz.

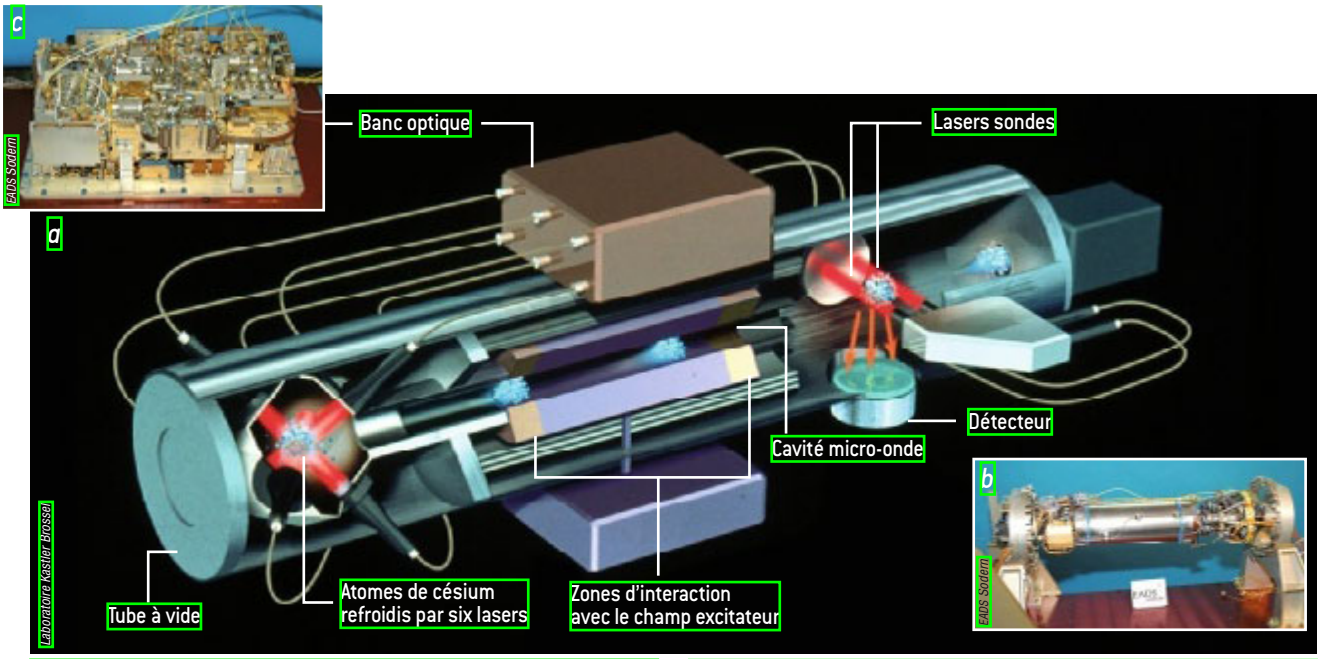
Ce champ lumineux est produit par un laser qui, comme l'oscillateur à quartz, est asservi sur une transition entre deux niveaux d'énergie des atomes. Cette transition correspond à une fréquence du spectre visible ou du proche ultraviolet. Les oscillations du champ lumineux étant bien plus rapides que celles du pendule, leur période est aussi beaucoup plus courte ; la mesure d'un infime intervalle de temps en comptant un nombre entier de périodes est donc *a priori* plus aisée avec une horloge optique qu'avec un pendule. Toutefois, comment compter ces oscillations si rapides ? Aucun photodétecteur n'est capable de répondre à un champ qui oscille aussi vite.

C'est ici que la contribution des prix Nobel de physique 2005, John Hall et Theodor Hänsch, est cruciale. Ces deux chercheurs et leurs équipes ont mis au point un « diviseur » de fréquences optiques efficace et simple à mettre en œuvre. Il repose sur l'utilisation d'un laser femtoseconde – un laser qui émet des impulsions ultracourtes (d'une durée de l'ordre de quelques femtosecondes, soit 10^{-15} seconde). Dans le domaine des fréquences, ces impulsions se traduisent par des raies régulièrement espacées, à l'image des dents d'un peigne – d'où leur nom « peigne de fréquence ». L'espacement des dents du peigne



3. UNE HORLOGE À FONTAINE ATOMIQUE : les atomes de césium sont refroidis par laser à une température de un microkelvin *(a)* et lancés vers le haut avec une vitesse de quatre mètres par seconde *(b)*. Ils retombent selon le même chemin sous l'effet de la gravité *(c)*. À la montée et à la descente, ils traversent la cavité micro-onde qui contient le champ excitateur. La durée entre les deux interactions atomes-champ atteint 0,5 seconde et est environ 100 fois plus longue que dans une horloge à jet thermique. Les atomes excités par le champ micro-onde sont comptés par la fluorescence qu'ils émettent lorsqu'ils sont éclairés par un faisceau sonde *(c)*. Un détecteur transmet l'information à un ordinateur qui verrouille la fréquence du champ excitateur sur la fréquence ν_0 de l'atome.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



4. PRINCIPE de l'horloge à atomes froids PHARAO en microgravité *(a)*. Les atomes de césium sont refroidis par laser dans une chambre à vide *(à gauche)*, puis envoyés lentement dans une cavité micro-onde où ils subissent deux interactions successives avec le champ excitateur produit par un maser à hydrogène et accordé sur la fréquence de l'atome de césium. Les atomes excités sont ensuite détectés par fluorescence provoquée par laser *(à droite)*. Comme dans la fontaine atomique, le champ excitateur est asservi sur la fréquence de l'atome de césium grâce à un montage électronique qui transmet au maser la fréquence mesurée par la fluorescence. Pour une vitesse de lancement de dix centimètres par seconde, la largeur de la résonance attendue en microgravité est 0,2 hertz, soit cinq fois plus étroite que dans une fontaine atomique en présence de gravité. Le tube à vide qui contient l'ensemble mesure 90 centimètres de long et pèse 45 kilogrammes *(b)*. Le banc optique, qui produit et stabilise les lasers du montage, occupe un volume de 30 litres et pèse 20 kilogrammes *(c)*. Les faisceaux sont acheminés jusqu'au tube par fibres optiques.

est facilement mesurable, car il appartient au domaine des ondes radio, et chaque dent du peigne possède une fréquence qui est un multiple entier de cet espacement.

Asservi, comme le champ lumineux excitateur, sur la transition atomique, le laser femtoseconde sert de règle graduée : en combinant le champ lumineux excitateur et le peigne de fréquence, il est possible de déterminer la dent du peigne la plus proche de la fréquence du champ excitateur, ce qui permet de relier les fréquences rapides du domaine optique au domaine radio où les signaux oscillants sont plus lents. Ces signaux peuvent alors être transmis simplement par des câbles, et les périodes d'oscillation comptées par des méthodes électroniques usuelles. Le diviseur peut aussi être utilisé en sens inverse, comme multiplicateur, et réaliser, à partir des basses fréquences, des références de fréquences précises dans le domaine visible du spectre.

L'amélioration des performances des horloges est spectaculaire : en un peu plus de quatre siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeur par rapport au pendule de Huygens et, sur les 50 dernières années, le gain est d'un facteur 10 tous les dix ans.

Revenons au principe des fontaines atomiques. Nous l'avons vu, dans la méthode inventée par N. Ramsey, il n'est pas nécessaire que le champ oscillant éclaire en permanence les atomes. Deux interactions successives suffisent et c'est l'intervalle de temps entre ces interactions qui donne la précision de l'horloge : plus l'intervalle de temps est grand, plus l'horloge est précise. Pour allonger ce temps, il est donc tentant de lancer les atomes de la fontaine le plus haut possible : une expérience à l'Université Stanford explore cette direction avec une fontaine de dix mètres de haut. De telles dimensions apportent cependant de nouvelles contraintes, et le gain en précision attendu n'évolue que comme la racine carrée de la hauteur ; dans cette expérience, il sera d'un facteur trois par rapport aux fontaines en fonctionnement.

S'affranchir de la pesanteur...

Une solution plus radicale est de s'affranchir de l'accélération de la pesanteur. Dans une fontaine atomique, pour contrer la gravité et projeter suffisamment haut les atomes, il faut leur donner une vitesse assez grande, de l'ordre de quatre mètres par seconde ; en impesanteur, en revanche, il est possible d'envoyer la boule d'atomes refroidis à une vitesse 40 fois inférieure – de l'ordre de dix centimètres par seconde –, ce qui permet d'augmenter considérablement le délai entre les deux interactions avec le champ oscillant. C'est le projet spatial PHARAO (Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite) conduit par le CNES et des laboratoires français.

Le principe de l'horloge en microgravité PHARAO s'apparente à celui de l'horloge de Essen et Parry, où les atomes du jet atomique sont remplacés par un jet ultralent d'atomes refroidis par laser *(voir la figure 4)*. L'absence de gravité qui règne à bord d'un satellite permet aux atomes d'évoluer à vitesse constante et les deux zones d'interaction sont séparées spatialement. Dans un dispositif compact, on espère produire une courbe de résonance cinq à dix fois plus étroite que dans une fontaine atomique, soit près de 10 000 fois plus étroite que dans une horloge commerciale.

L'horloge PHARAO sera un élément central de la mission spatiale européenne ACES *(Atomic Clock Ensemble in Space)* de l'Agence spatiale européenne (ESA). La charge utile ACES sera installée en 2013 à bord de la Station spatiale internationale, en orbite autour de la Terre à une altitude moyenne de 400 kilomètres selon une période d'environ une heure et demie, soit 5 400 secondes.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Outre l'horloge PHARAO, la mission spatiale ACES comporte un maser à hydrogène développé en Suisse, qui remplace l'oscillateur à quartz, un système de comparaison de temps sol-bord ultraprécis par échange de signaux radio développé en Allemagne, un transfert de temps par laser, un récepteur GPS/GALILEO (le futur système européen de localisation par satellite) et des équipements de support (ordinateur de bord, ...). L'ensemble pèse 220 kilogrammes et consomme moins de 450 watts, soit la puissance requise pour faire fonctionner en même temps… sept lampes à incandescence de 60 watts.

… pour vérifier l'effet Einstein

Les objectifs scientifiques d'une telle mission comportent plusieurs volets. Tout d'abord, l'horloge PHARAO en microgravité et le maser à hydrogène réaliseront dans l'espace une échelle de temps combinée de très haute stabilité. Le maser à hydrogène est en effet une horloge atomique très stable à court terme, alors que l'horloge PHARAO est très stable à moyen et long termes. En asservissant le maser sur l'horloge PHARAO, on combinera ces propriétés, qui conduiront à une échelle de temps très stable à court, moyen et long termes.

Cette échelle de temps sera comparée à celle fournie par un réseau d'horloges au sol. Il sera alors possible de mesurer avec une grande précision l'effet Einstein, le décalage gravitationnel des horloges prévu par la relativité générale : la fréquence de l'horloge PHARAO, mesurée par le réseau d'horloges au sol, apparaîtra plus élevée que la fréquence des horloges terrestres d'une quantité gH/c^2, où g est l'accélération de la pesanteur, H l'altitude de la station spatiale et c la vitesse de la lumière. En d'autres termes, le temps s'écoule plus vite lorsqu'on s'éloigne du champ gravitationnel de la Terre.

À l'altitude de 400 kilomètres, on attend un décalage relatif en fréquence de $4{,}5\times10^{-11}$. Avec des horloges stables dont l'incertitude en fréquence n'excède pas 10^{-16}, l'effet Einstein pourra être testé à 2×10^{-6} près – une amélioration d'un facteur 70 par rapport à la précédente expérience spatiale *Gravity Probe A* de la NASA en 1976. Cette expérience a comparé pendant deux heures la fréquence d'un maser envoyé à bord d'une fusée sonde à 20 000 kilomètres d'altitude à celle d'un maser au sol et constitue encore aujourd'hui le test le plus précis de l'effet Einstein.

En second lieu, grâce à cette échelle de temps spatiale très stable, il sera possible de comparer entre elles les diverses horloges au sol qui participeront à la mission. Celles-ci fonctionnent souvent sur des principes physiques différents, utilisent d'autres atomes ou encore d'autres transitions atomiques. Cela permettra alors de tester une idée soulevée par le physicien britannique Paul Dirac (1902-1984) : les constantes fondamentales de la physique sont-elles invariables dans le temps ? L'objectif de la mission ACES est ici de réaliser un tel test au niveau global avec une sensibilité de 10^{-17} par an.

Par exemple, la « constante de structure fine » qui caractérise l'interaction électromagnétique et qui est responsable de la stabilité des atomes et des molécules a-t-elle évolué depuis les premiers âges de l'Univers ? Ou encore le rapport des masses des constituants fondamentaux de la matière que sont les protons et les électrons change-t-il avec l'âge de l'Univers ? L'enjeu de cette recherche est considérable : si l'on détecte une variation de l'une de ces quantités, ce sera le signe que le principe d'équivalence, l'un des fondements, depuis les travaux d'Einstein, de notre description actuelle de la physique, est violé. Cela indiquerait que de nouvelles interactions ou nouvelles forces sont en jeu, qu'il faudra découvrir et étudier… Rappelons que les astrophysiciens nous indiquent que près de 80 pour cent de la masse de l'Univers visible aujourd'hui est constituée de matière noire d'origine inconnue : cette matière interagirait-elle avec la matière visible selon un type de force encore inconnu ?

Mesurer le géoïde terrestre

Outre les tests des lois fondamentales de la physique et l'amélioration du Temps atomique international par comparaison entre horloges, la mission ACES comporte des objectifs scientifiques appliqués. Le premier a trait à la géodésie. Une fois testée la validité du décalage gravitationnel des horloges, on pourra utiliser l'effet Einstein pour évaluer le relief terrestre selon une nouvelle méthode : la détermination de la différence des potentiels gravitationnels entre deux horloges distantes.

L'AUTEUR

Christophe SALOMON, directeur de recherche au CNRS, dirige le groupe « Gaz de Fermi ultrafroids » au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris, une des équipes engagées dans le projet PHARAO.

✔ POUR INFO

Le 27 novembre, la Société française de physique et la Bibliothèque nationale de France organisent la **12e rencontre *Physique et interrogations fondamentales*** sur le thème : « Aux frontières de la connaissance : les instruments de l'extrême ». Christophe Salomon y évoquera à 10h15 la mesure du temps. Pour en savoir plus : http://sfp.in2p3.fr/CP/pifn/fren12.htm

✔ BIBLIOGRAPHIE

L. Cacciapuoti et Ch. Salomon, ***Space clocks and fundamental tests : the ACES experiments***, *European Physical Journal (Special topics)*, vol. 172, pp. 57-68, 2009.

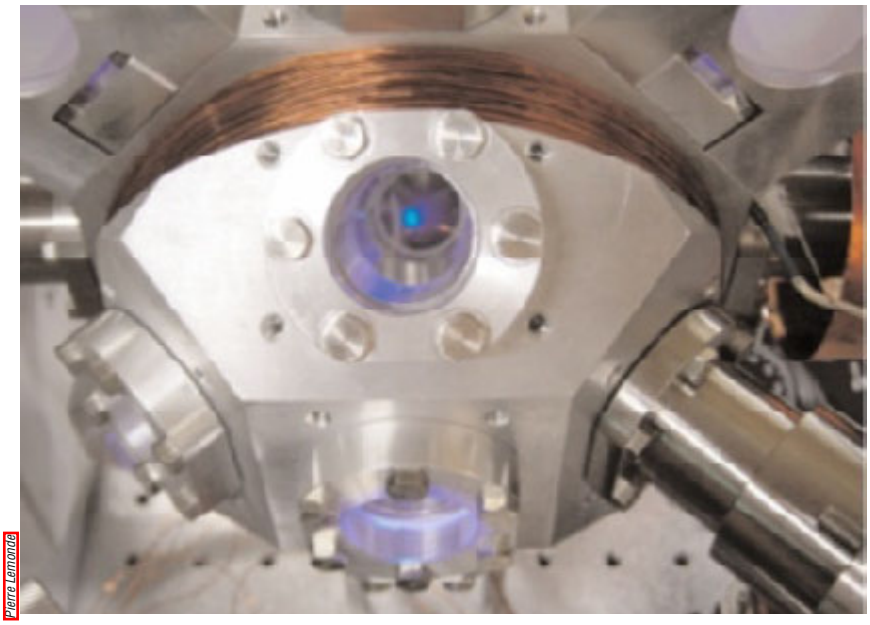
S. Schiller *et al.*, **Optical clocks in space**, *Nuclear Physics B* (Proc.Suppl.), vol. 166, pp. 300-302, 2007.

G. M. Tino *et al.*, **Atom interferometers and atomic clocks : new quantum sensors for fundamental physics experiments in space**, *Nuclear Physics B* (Proc. Suppl.), vol. 166, pp. 159-165, 2007.

Le site Internet du projet PHARAO : http://smsc.cnes.fr/PHARAO/Fr/

M. Mashaal, **La relativité à l'épreuve du décimètre**, *Pour la Science*, 23 septembre 2010, en ligne sur : http://tinyurl.com/mm100923.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



Pierre Lemonde

5. UNE HORLOGE OPTIQUE À ATOMES DE STRONTIUM refroidis par laser en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au Laboratoire LNE-SYRTE de l'Observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est l'un des plus prometteurs pour atteindre une incertitude en fréquence de l'ordre de 10^{-18}.

Le potentiel gravitationnel est une grandeur physique qui traduit l'attraction qu'exerce une masse (en l'occurrence la Terre) sur toute autre masse. La force de pesanteur associée à ce potentiel dépend des deux masses et de la distance les séparant. Supposons que ces deux horloges soient identiques, au repos, et leur fréquences comparées à distance par la mission ACES ou, pour des distances plus faibles, par fibre optique. Leur écart de fréquence sera directement imputable à leur différence de potentiel gravitationnel.

Cette nouvelle méthode de géodésie pourra être comparée à celles utilisées actuellement pour déterminer le géoïde terrestre, surface où le potentiel gravitationnel est égal en tout point et qui décrit le mieux le champ gravitationnel de la Terre. Les méthodes actuelles reposent sur des missions spatiales ou des méthodes de nivellement terrestres. La mission ACES vise à montrer que ce nouveau type de géodésie relativiste est possible avec une sensibilité en distance verticale de l'ordre de dix centimètres.

ACES s'appuiera sur les derniers développements d'horloges optiques, telles celles mises au point par l'équipe de David Wineland au NIST, l'Institut américain des étalons et de la technologie, à Boulder. Cette équipe vient de montrer que la sensibilité des horloges optiques actuelles est telle que l'effet Einstein peut être détecté sur une distance de seulement 30 centimètres ! (Pour transformer cette démonstration de principe en test de la relativité, il faudra bien sûr augmenter cette distance à bien plus grande échelle en envoyant ces nouvelles horloges dans l'espace ; plusieurs propositions dans ce sens pour prendre le relais de la mission ACES/PHARAO à l'horizon 2022 sont en cours.)

Si l'on extrapole les performances des horloges actuelles dans dix ans, les horloges optiques devraient atteindre une stabilité de fréquence de 10^{-18}, soit l'équivalent de un centimètre de décalage gravitationnel. À cette échelle, le potentiel terrestre n'est plus du tout stable ; il varie selon l'état des marées océaniques, la pression atmosphérique, les vents et le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques. Ainsi, si les horloges deviennent un nouveau type de détecteur géodésique, on peut craindre que ces fluctuations du potentiel terrestre ne limitent la qualité de la mesure du temps et de ses applications.

Une solution possible sera d'installer dans l'espace une ou plusieurs horloges ultrastables de façon à s'affranchir de ces fluctuations, dont l'influence décroît très vite lorsqu'on s'éloigne de la surface terrestre.

Une seconde classe d'applications repose sur l'utilisation du récepteur GPS/GALILEO placé sur la plateforme ACES pour étudier l'atmosphère terrestre. Lorsqu'ils apparaissent ou disparaissent au-dessus de l'horizon vu de la Station spatiale internationale, les signaux émis par les satellites du système GPS sont perturbés par la vapeur d'eau de l'atmosphère qu'ils traversent. De même, ils sont affectés par les différences de température en fonction de l'altitude. Les météorologues utilisent ces signaux pour reconstituer une carte des zones nuageuses et les profils de température de l'atmosphère. Une autre direction de recherche est l'exploitation de la réflexion des signaux GPS sur la surface de la mer, qui donne accès à la hauteur des vagues et à leur direction.

L'avenir de la mesure du temps

La mission spatiale ACES aborde la dernière phase de réalisation avant son lancement vers la Station spatiale internationale. Les modèles d'ingénierie des instruments ont été réalisés et testés durant les années 2008-2010. L'horloge PHARAO et les autres instruments de vol sont en cours de fabrication par les industriels. Ils seront assemblés et testés au centre spatial du CNES à Toulouse avant d'être acheminés vers Friedrichshafen, en Allemagne, où l'intégration globale sur la plateforme ACES sera réalisée. Le lancement dans l'espace sera réalisé par une fusée japonaise dans la seconde moitié de 2013 pour une durée de mission de 18 mois à 3 ans. Les équipes d'ingénieurs et de scientifiques préparent maintenant les opérations en vol, l'acquisition des données et leur exploitation.

Jusqu'où les horloges atomiques pourront-elles progresser avant qu'une nouvelle technologie ne vienne les surpasser ? Après 45 ans de bons et loyaux services, la définition actuelle de la seconde fondée sur l'atome de césium est aujourd'hui dépassée d'un facteur 20 par les horloges optiques. Il faudra donc changer la définition de la seconde du Système international. Les atomes candidats sont nombreux – strontium *(voir la figure 5)*, ytterbium, mercure, aluminium… – et les travaux en laboratoire explorent plusieurs pistes pour atteindre des incertitudes en fréquence inférieures à 10^{-18}, voire 10^{-19}. Gageons que de nouvelles applications scientifiques et de nouvelles idées pour mesurer le temps de façon de plus en plus précise verront le jour dans les prochaines années ! ■

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

ÉDITIONS JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques - 75005 Paris (France)
Tél. : +33 (0)1 43 54 64 64 - Fax : +33 (0)1 43 54 87 00
E-mail : infos@gabay.com

www.gabay.com

ACADÉMIE FRANÇAISE
GRAND PRIX DU RAYONNEMENT DE LA LANGUE FRANÇAISE
JACQUES GABAY
MÉDAILLE DE VERMEIL

TARIF 2011

Louis BACHELIER
1870-1946

Émile BOREL
1871-1956

Élie CARTAN
1869-1951

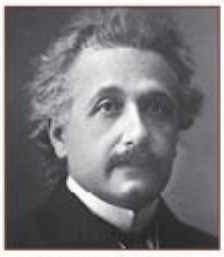
Préfixe ISBN
978-2-87647

N = Nouveauté

073-6 ABEL : Œuvres complètes
+ BJERKNES : Abel. Sa vie et son action scientifique
(2 titres en 2 vol.) . . . . . 167 €
064-4 d'ALEMBERT : Traité de Dynamique . . . . . 39 €
336-2 N d'ALEMBERT : Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides . . 82 €
060-2 AMPÈRE : Théorie mathématique des phénomènes
électro-dynamiques . . . . . 35 €
326-3 AMPÈRE : Considérations sur la théorie mathématique du jeu . 25 €
310-2 N ANDRADE : Leçons de Mécanique physique . . . . . 72 €
010-1 o APPELL : Traité de Mécanique rationnelle (6 vol. en 3) . . . . 197 €
089-7 ARTIN : Algèbre géométrique . . . . . 35 €
129-0 BACHELIER : Théorie de la spéculation
+ Théorie mathématique du jeu (2 titres en 1 vol.) . . . . . 27 €
090-3 BACHELIER : Calcul des probabilités . . . . . 74 €
147-4 BACHELIER : Le jeu, la chance et le hasard . . . . . 34 €
124-5 BAIRE : Leçons sur les fonctions discontinues . . . . . 17 €
099-6 BAIRE : Théorie des nombres irrationnels,
des limites et de la continuité . . . . . 13 €
228-0 BALL : Histoire des mathématiques (2 vol.) . . . . . 116 €
140-5 o BALL : Récréations mathématiques (3 vol. en 1) . . . . . 93 €
148-1 o BANACH : Théorie des opérations linéaires . . . . . 30 €
067-5 BARBARIN : La géométrie non euclidienne . . . . . 28 €
040-8 BAUER : Théorie des groupes et ses applications
à la physique quantique . . . . . 28 €
279-2 BECKER : Théorie des électrons . . . . . 69 €
331-7 N BERNOULLI Jacques : L'Art de conjecturer, Partie I
contient
HUYGENS : Traité de la manière de raisonner
dans les jeux de hasard . . . . . 40 €
128-3 BERTRAND : Calcul des probabilités . . . . . 60 €
290-7 BERTRAND : Traité de calcul différentiel et de calcul intégral
(2 vol.) . . . . . 195 €
153-5 BOHR : La théorie atomique et la description
des phénomènes . . . . . 21 €
044-6 o BOLL : La chance et les jeux de hasard . . . . . 37 €
004-0 BOLTZMANN : Leçons sur la théorie des gaz (2 vol. en 1) . . . 49 €
086-6 BOREL : Leçons sur la théorie des fonctions . . . . . 54 €
009-5 BOREL : Leçons sur les séries divergentes . . . . . 32 €
340-9 BOREL : Valeur pratique et philosophie des probabilités . . . . . 39 €
337-9 BOREL - CHÉRON : Théorie mathématique du bridge . . . . . 69 €
339-3 BOREL - VILLE : Applications de la théorie des probabilités
aux jeux de hasard . . . . . 33 €
149-8 o BOREVITCH - CHAFAREVITCH : Théorie des nombres . . . . . 50 €
230-3 BORN : La Théorie de la Relativité d'Einstein
et ses bases physiques . . . . . 60 €
084-2 o BOUTROUX : L'idéal scientifique des mathématiciens . . . . . 34 €
317-1 N BOUTROUX : Les principes de l'analyse mathématique
(2 vol.) . . . . . 164 €
150-4 o BRAHY : Exercices méthodiques de calcul différentiel
et intégral (2 vol. en 1) . . . . . 58 €
003-3 BRILLOUIN : Les tenseurs en mécanique et en élasticité . . . . 37 €
036-1 BRILLOUIN : La science et la théorie de l'information . . . . . 38 €
229-7 de BROGLIE : Éléments de théorie des quanta
et de mécanique ondulatoire . . . . . 54 €
041-5 de BROGLIE : Ondes et mouvements . . . . . 24 €
062-0 CANTOR : Sur les fondements de la théorie des ensembles
transfinis . . . . . 24 €
284-6 CARNOT Lazare : Réflexions sur la métaphysique
du calcul infinitésimal . . . . . 45 €
069-9 CARNOT Sadi : Réflexions sur la puissance motrice du feu . . 25 €
008-8 CARTAN : Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann . . 60 €
015-6 o CARTAN : Leçons sur la géométrie projective complexe
+ La théorie des groupes finis et continus
et la géométrie différentielle
+ Leçons sur la théorie des espaces à connexion projective
(3 titres en 1 vol.) . . . . . 69 €
289-1 CATALAN : Traité élémentaire des séries . . . . . 36 €
319-5 N CATALAN : Mélanges mathématiques (3 vol.) . . . . . 180 €
053-8 CAUCHY : Analyse algébrique . . . . . 68 €
057-6 CHASLES : Aperçu historique des méthodes en géométrie . . . 68 €
058-3 CHASLES : La dualité et l'homographie . . . . . 42 €
257-0 CHASLES : Traité de Géométrie supérieure . . . . . 96 €
282-2 CHASLES : Traité des sections coniques . . . . . 78 €
258-7 CHASLES : Les trois livres de Porismes d'Euclide . . . . . 63 €
259-4 CHASLES : Rapport sur les Progrès de la Géométrie . . . . . 69 €
260-0 CHAZY : La Théorie de la Relativité et la Mécanique céleste
(2 vol.) . . . . . 99 €
273-0 CLAIRAUT : Éléments de géométrie . . . . . 54 €
283-9 CLAPEYRON : Mémoire sur la puissance motrice
de la chaleur . . . . . 18 €
079-8 o CLAUSIUS : Théorie mécanique de la chaleur (2 vol. en 1) . . 53 €
COMMISSAIRE - CAGNAC : Cours de Mathématiques
Spéciales
201-3 t. I, Éléments d'algèbre et de géométrie analytique . . . . . 72 €
202-0 t. II, Éléments d'analyse. Applications géométriques . . . . . 58 €
203-7 t. III, Calcul intégral. Courbes et surfaces du second ordre . . . 71 €
081-1 CORIOLIS : Théorie mathématique des effets du jeu de billard
+ Sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs
des machines
+ Sur les équations du mouvement relatif des systèmes
de corps (3 titres en 1 vol.) . . . . . 60 €

o = oblong

Jean DIEUDONNÉ
1906-1992



Albert EINSTEIN
1879-1955

Évariste GALOIS
1811-1832

301-0 COSSERAT E. et F. : Théorie des corps déformables ..... 40 €
134-4 COXETER - GREITZER : Redécouvrons la géométrie ..... 35 €
016-3 o DARBOUX : Leçons sur la théorie générale des surfaces
+ Leçons sur les systèmes orthogonaux
et les coordonnées curvilignes
+ Principes de géométrie analytique (3 titres en 3 vol.) .... 227 €
222-8 DAUMAS : Les instruments scientifiques
aux XVII[e] et XVIII[e] siècles ..... 102 €
DELAMBRE : Histoire de l'Astronomie
250-1 Histoire de l'Astronomie ancienne (2 vol.) ..... 190 €
251-8 Histoire de l'Astronomie du moyen âge ..... 110 €
252-5 Histoire de l'Astronomie moderne (2 vol.) ..... 235 €
253-2 Histoire de l'Astronomie au XVIII[e] siècle ..... 125 €
346-1 N DELTHEIL - CAIRE : Géométrie ..... 54 €
347-8 N DELTHEIL - CAIRE : Compléments de géométrie ..... 72 €
324-9 N DEMARTRES : Cours de géométrie infinitésimale ..... 69 €
307-2 DENJOY : Mémoire sur la dérivation et son calcul inverse ... 69 €
019-4 DESCARTES : La Géométrie ..... 20 €
210-5 DIEUDONNÉ : Panorama des mathématiques pures.
Le choix bourbachique ..... 56 €
DIEUDONNÉ : Éléments d'analyse
211-2 t. I, Fondements de l'analyse moderne ..... 62 €
212-9 t. II, Éléments d'analyse ..... 65 €
213-6 t. III, Éléments d'analyse ..... 61 €
214-3 t. IV, Éléments d'analyse ..... 63 €
215-0 t. V, Groupes de Lie ..... 46 €
216-7 t. VI, Analyse harmonique ..... 45 €
217-4 t. VII, Équations fonctionnelles linéaires - I :
Opérateurs pseudo-différentiels ..... 54 €
218-1 t. VIII, Équations fonctionnelles linéaires - II :
Problèmes aux limites ..... 57 €
219-8 t. IX, Topologie algébrique et topologie différentielle élémentaire . 61 €
271-6 DINGELDEY - FABRY : Coniques + Systèmes de coniques .. 52 €
071-2 DIRAC : Les principes de la Mécanique quantique ..... 60 €
012-5 DIXMIER : Les algèbres d'opérateurs dans l'espace hilbertien
(Algèbres de von Neumann) ..... 54 €
013-2 DIXMIER : Les C* algèbres et leurs représentations ..... 57 €
014-9 DIXMIER : Algèbres enveloppantes ..... 52 €
158-0 o DU BOIS-REYMOND : Théorie générale des fonctions ..... 23 €
156-6 DUGAC : Jean Dieudonné, mathématicien complet
(Collection "Plus de Lumière") ..... 30 €
025-5 DUGAS : Histoire de la Mécanique ..... 87 €
254-9 DUHEM : Les Origines de la Statique (2 vol.)
(Collection "Plus de Lumière") ..... 135 €
200-6 o DUHEM : Traité d'Énergétique ou de Thermodynamique
générale (2 vol. en 1) ..... 87 €
302-7 DU PASQUIER : Léonard Euler et ses amis
+ CONDORCET : Éloge d'Euler ..... 38 €
160-3 o DUPORCQ : Premiers principes de géométrie moderne ..... 19 €
143-6 DUPUY : La vie d'Évariste Galois ..... 10 €
341-6 EDDINGTON : Espace, Temps et Gravitation ..... 69 €
276-1 EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement
(trad. M. Solovine) ..... 15 €
249-5 EINSTEIN : La Théorie de la Relativité restreinte et généralisée
(trad. J. Rouvière) ..... 33 €
342-3 EINSTEIN :
Les fondements de la Théorie de la Relativité générale
+ Théorie unitaire de la gravitation et de l'électricité
+ Sur la structure cosmologique de l'espace (3 titres en 1 vol) 21 €
277-8 EINSTEIN : Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité
(trad. M. Solovine) ..... 21 €
275-4 EINSTEIN : Lettres à Maurice Solovine ..... 45 €
155-9 o EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement
+ L'Éther et la Théorie de la Relativité
+ La Géométrie et l'Expérience
+ Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité
+ Sur le Problème cosmologique
+ Théorie relativiste du champ non symétrique
+ Théorie de la Gravitation généralisée (7 titres en 1 vol.) .... 34 €
151-1 o ENRIQUES : Leçons de géométrie projective ..... 43 €
256-3 EUCLIDE : Les Œuvres d'Euclide, en grec, en latin
et en français (F. Peyrard) (3 vol.) ..... 261 €
291-4 EULER : Introduction à l'Analyse infinitésimale (2 vol.) ..... 144 €
335-5 F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Éléments de géométrie ..... 80 €
083-5 o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Exercices de géométrie. ..... 89 €
170-2 o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Géométrie descriptive
- Éléments + Exercices (2 vol.) ..... 133 €
168-9 o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Trigonométrie
- Éléments + Exercices (2 vol. en 1) ..... 90 €
280-8 FERMAT : Précis des Œuvres mathématiques
et de l'Arithmétique de Diophante ..... 36 €
167-2 o FITZ-PATRICK : Exercices d'arithmétique ..... 65 €
046-0 FOURIER : Théorie analytique de la chaleur ..... 75 €
056-9 FRÉCHET : Les espaces abstraits ..... 43 €
304-1 FRÉCHET - Ky FAN : Introduction à la topologie combinatoire .... 24 €
020-0 GALOIS : Écrits et mémoires mathématiques (Bourgne - Azra) .... 87 €
052-1 GALOIS : Œuvres mathématiques (Liouville)
+ LIE : Influence de Galois (2 titres en 1 vol.) ..... 17 €
137-5 GALOIS : Œuvres mathématiques (Picard)
+ Manuscrits (J. Tannery) (2 titres en 1 vol.) ..... 31 €
135-1 GAMOW : Trente années qui ébranlèrent la physique ..... 41 €
035-4 GANTMACHER : Théorie des matrices (2 vol en 1) ..... 82 €
054-5 GAUSS : Recherches arithmétiques ..... 64 €
332-4 GAUSS : Méthode des moindres carrés ..... 38 €
293-8 GAUSS : Recherches générales sur les surfaces courbes
+ Représentation conforme (2 titres en 1 vol.) ..... 27 €
327-0 GAUSS : Théorie du mouvement des corps célestes
parcourant des sections coniques autour du soleil ..... 72 €
206-8 GEORGE : Exercices et problèmes d'intégration ..... 69 €
154-2 o GERLL - GIRARD : Les Olympiades internationales
de mathématiques ..... 16 €
123-8 GIBBS : Équilibre des systèmes chimiques ..... 46 €
146-7 o GODEAUX : Les Géométries ..... 23 €
032-3 o GOURSAT : Cours d'Analyse mathématique (3 vol.) ..... 149 €
152-8 o GREENHILL : Les fonctions elliptiques et leurs applications .. 60 €
095-8 o GRIMAUX : Lavoisier, 1743-1794 ..... 45 €
038-5 HADAMARD : Leçons de géométrie élémentaire (2 vol.) ... 104 €
292-1 HADAMARD : Leçons sur le calcul des variations ..... 81 €
297-6 HADAMARD : Essai sur la psychologie de l'invention
dans le domaine mathématique
+ POINCARÉ : L'Invention mathématique (2 titres en 1 vol.) . 30 €
299-0 HADAMARD : Leçons sur la propagation des ondes
et les équations de l'hydrodynamique ..... 69 €
300-3 HADAMARD : Le problème de Cauchy et les équations
aux dérivées partielles linéaires hyperboliques ..... 84 €
126-9 HALMOS : Introduction à la théorie des ensembles ..... 23 €
220-4 HALPHEN : Traité des fonctions elliptiques
et de leurs applications (3 vol.) ..... 205 €
131-3 HARDY : Divergent Series (en anglais) ..... 58 €

o = oblong

Charles HERMITE
1822-1901

Joseph-Louis LAGRANGE
1736-1813

Pierre-Simon LAPLACE
1749-1827

080-4 HEISENBERG : Les principes physiques de la théorie des quanta . . . . . 28 €
063-7 HELMHOLTZ : Optique physiologique (2 vol.) . . . . . 149 €
074-3 HELMHOLTZ : Théorie physiologique de la musique . . . . . 71 €
343-0 HERMITE : Cours d'Analyse de la Sorbonne . . . . . 69 €
345-4 N HERMITE : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique . . . . . 72 €
338-6 HERMITE - STIELTJES : Correspondance (2 vol.) . . . . . 150 €
037-8 HILBERT : Sur les problèmes futurs des mathématiques (Les 23 Problèmes) . . . . . 16 €
043-9 HILBERT : Théorie des corps de nombres algébriques . . . . . 57 €
127-6 HILBERT : Les fondements de la géométrie . . . . . 48 €
018-7 o JORDAN : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique (3 vol.) . . . 135 €
021-7 JORDAN : Traité des substitutions et des équations algébriques . . 79 €
221-1 JOUFFRET : Traité élémentaire de géométrie à quatre dimensions + Mélanges de géométrie à quatre dimensions (2 titres en 1 vol.). . . . . 69 €
248-8 JOUGUET : Lectures de Mécanique (2 vol. en 1) . . . . . 90 €
145-0 o KAMKE : Théorie des ensembles . . . . . 26 €
005-7 KLEENE : Logique mathématique . . . . . 60 €
011-8 KLEIN : Le programme d'Erlangen . . . . . 19 €
262-4 KNESER - ZERMELO - HAHN - LECAT : Calcul des variations . . 54 €
141-2 o KURATOWSKI : Topologie I et II (2 vol. en 1) . . . . . 90 €
087-3 o LADRIÈRE : Les limitations internes des formalismes. Étude sur la signification du théorème de Gödel. . . . . 65 €
051-4 LAGRANGE : Mécanique analytique (1re éd., 1788) . . . . . 64 €
LAGRANGE : Œuvres
237-2 t. III Mémoires de Berlin (VII à XXII) (2 vol.) . . . . . 144 €
242-6 t. VIII Traité de la résolution des équations numériques de tous les degrés . . . . . 72 €
243-3 t. IX Théorie des fonctions analytiques . . . . . 75 €
244-0 t. X Leçons sur le calcul des fonctions . . . . . 81 €
245-7 t. XI et XII Mécanique analytique (4e éd.) (J. Bertrand et G. Darboux) (2 vol.) . . . . . 162 €
246-4 t. XIII Correspondance inédite de Lagrange et d'Alembert . . . 73 €
247-1 t. XIV Correspondance de Lagrange avec Condorcet, Laplace, Euler et divers savants. . . . . 72 €
007-1 LALESCO : La géométrie du triangle . . . . . 30 €
261-7 LAMÉ : Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides . . . . . 61 €
286-0 LAMÉ : Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie. . . . . 36 €
LAPLACE : Œuvres
234-1 t. I à V Traité de Mécanique céleste (5 vol.) . . . . . 360 €
233-4 t. VI Exposition du Système du Monde . . . . . 72 €
161-0 t. VII Théorie analytique des probabilités (2 vol.). . . . . 120 €
226-6 von LAUE : La Théorie de la Relativité (2 vol.). . . . . 113 €
159-7 o LA VALLÉE POUSSIN : Intégrales de Lebesgue . . . . . 21 €
227-3 LA VALLÉE POUSSIN : Cours d'Analyse infinitésimale (2 vol.) 140 €
096-5 o LAVOISIER : Traité élémentaire de chimie (2 vol. en 1). . . . . 75 €
059-0 LEBESGUE : Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives . . . . . 49 €
022-4 LEBESGUE : Les coniques . . . . . 28 €
002-6 LEBESGUE : Leçons sur les constructions géométriques . . . 53 €
077-4 LEBOSSÉ - HÉMERY : Géométrie (classe de Mathématiques) . . 49 €
308-9 LEGENDRE : Théorie des nombres (2 vol.) . . . . . 150 €
072-9 LEVI-CIVITA : Caractéristiques des systèmes différentiels et propagation des ondes . . . . . 21 €
091-0 o LÉVY : Processus stochastiques et mouvement brownien. . . . 43 €
207-5 LÉVY : Théorie de l'addition des variables aléatoires . . . . . 60 €
231-0 LÉVY : Calcul des probabilités . . . . . 60 €

039-2 LIAPOUNOFF : Problème général de la stabilité du mouvement . 35 €
281-5 LICHNEROWICZ : Éléments de calcul tensoriel . . . . . 36 €
296-9 LICHNEROWICZ : Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme. . . . . 60 €
298-3 LICHNEROWICZ : Algèbre et analyse linéaires . . . . . 60 €
060-6 LINDELÖF : Le calcul des résidus et ses applications à la théorie des fonctions . . . . . 27 €
130-6 o LORENTZ : The Theory of Electrons (en anglais) . . . . . 31 €
042-2 o LUCAS : Théorie des nombres . . . . . 41 €
125-2 LUSIN : Leçons sur les ensembles analytiques et leurs applications + LEBESGUE : Sur les fonctions représentables analytiquement (2 titres en 1 vol.). . . . . 60 €
006-4 MACH : La Mécanique . . . . . 50 €
138-2 o MacLANE - BIRKHOFF : Algèbre + Solutions développées des exercices (5 vol. en 1) . . . . . 102 €
157-3 o MANDEL : Cours de Mécanique des milieux continus (2 vol. en 1). . . . . 75 €
045-3 MAXWELL : Traité d'Électricité et de Magnétisme (2 vol.). . . . 150 €
205-1 o MAXWELL : La Chaleur . . . . . 38 €
088-0 o MEYERSON : La déduction relativiste . . . . . 38 €
163-4 o MICHEL : Compléments de géométrie moderne + LEMAIRE : Exercices de géométrie moderne + SINGIER : Les correspondances algébriques (3 titres en 1 vol.). . . . . 58 €
MOLK : Encyclopédie des Sciences Mathématiques Pures et Appliquées
122-1 o Collection complète, tomes I à VIII (22 vol.) . . . . port compris 768 €
Volumes séparés - port en sus
100-9 o I-1 Arithmétique . . . . . 58 €
101-6 o I-2 Algèbre . . . . . 57 €
102-3 o I-3 Théorie des nombres . . . . . 37 €
103-0 o I-4 Calcul des probabilités. Théorie des erreurs . . . . . 67 €
104-7 o II-1 Fonctions de variables réelles . . . . . 30 €
105-4 o II-2 Fonctions de variables complexes . . . . . 21 €
106-1 o II-3 Équations différentielles ordinaires . . . . . 28 €
107-8 o II-4 Équations aux dérivées partielles . . . . . 28 €
108-5 o II-5 Développements en séries. . . . . 37 €
109-2 o II-6 Calcul des variations . . . . . 34 €
110-8 o III-1 Fondements de la géométrie. Géométrie générale. . . . . 31 €
111-5 o III-2 Géométrie descriptive. Géométrie élémentaire . . . . . 24 €
112-2 o III-3 Géométrie algébrique plane . . . . . 35 €
113-9 o III-4 Géométrie algébrique dans l'espace . . . . . 27 €
114-6 o IV-1 Mécanique : Généralités. Historique . . . . . 34 €
115-3 o IV-2 Mécanique générale . . . . . 35 €
116-0 o IV-5 Systèmes déformables . . . . . 31 €
117-7 o IV-6 Balistique. Hydraulique . . . . . 30 €
118-4 o V-1 Thermodynamique + V-2 Physique moléculaire + V-3 Principes physiques de l'Électricité + V-4 Principes physiques de l'Optique (4 vol. en 1) . . . . . 37 €
119-1 o VI-1 Géodésie + VI-2 Géophysique (2 vol. en 1). . . . . 41 €
120-7 o VII-1 Astronomie sphérique. . . . . 41 €
121-4 o VIII Table des matières détaillée + Tribune publique (2 titres en 1 vol.) . . . . . 41 €
065-1 MONGE : Géométrie descriptive . . . . . 31 €
287-7 MONGE : Feuilles d'analyse appliquée à la géométrie. . . . . 45 €
288-4 MONTUCLA : Histoire des mathématiques (4 vol.) . . . . . 390 €
047-7 von NEUMANN : Les fondements mathématiques de la Mécanique quantique. . . . . 48 €

o = oblong

Isaac NEWTON
1642-1727

Henri POINCARÉ
1854-1912

Vito VOLTERRA
1860-1940

070-5 NEWTON : Principes mathématiques de la philosophie naturelle (2 vol.) . . . . . 144 €
315-7 NEWTON : Arithmétique universelle (2 vol.) . . . . . 125 €
344-7 N NEWTON : Optique (trad. J.-P. Marat) (2 vol.) . . . . . 96 €
225-9 NIELSEN : Traité élémentaire des nombres de Bernoulli . . . . . 62 €
144-3 o NOGUÈS : Théorème de Fermat. Son histoire . . . . . 19 €
164-1 o PAINLEVÉ : Les axiomes de la Mécanique . . . . . 15 €
085-9 o PAPELIER : Exercices de géométrie moderne (9 vol. en 1) . . 90 €
305-8 PAPELIER : Éléments de trigonométrie sphérique . . . . . 36 €
139-9 PARENT : Exercices de théorie des nombres . . . . . 45 €
030-9 PETERSEN : Résolution des problèmes de constructions géométriques . . . . . 20 €
075-0 o PICARD : Traité d'Analyse (3 vol.) . . . . . 135 €
278-5 PLANCK : Électromagnétisme . . . . . 69 €
303-4 PLANCK : Leçons de thermodynamique . . . . . 60 €
093-4 POGGENDORFF : Histoire de la physique . . . . . 82 €
209-9 POINCARÉ : Leçons de Mécanique céleste (3 vol.) . . . . . 178 €
165-8 o POINCARÉ : Théorie mathématique de la lumière (2 vol. en 1) . . 64 €
311-9 POINCARÉ : Leçons sur la théorie de l'élasticité . . . . . 45 €
312-6 POINCARÉ : Théorie analytique de la propagation de la chaleur . . 54 €
313-3 POINCARÉ : Les oscillations électriques . . . . . 57 €
314-0 POINCARÉ : Cinématique et mécanismes . . . . . 63 €
166-5 o POINCARÉ : Thermodynamique . . . . . 43 €
028-6 POINCARÉ : Électricité et Optique . . . . . 86 €
285-3 POINCARÉ : Capillarité . . . . . 42 €
024-8 POINCARÉ : Théorie du potentiel newtonien . . . . . 52 €
001-9 POINCARÉ : Calcul des probabilités . . . . . 32 €
023-1 POINCARÉ : La Mécanique nouvelle (Théorie de la Relativité) . . 25 €
026-2 POINCARÉ : Théorie des tourbillons . . . . . 37 €
027-9 POINCARÉ : Figures d'équilibre d'une masse fluide . . . . . 37 €
098-9 POINCARÉ : Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle + Thèse + Note + BRIOT - BOUQUET : Trois Mémoires (6 titres en 1 vol.) . . . . 75 €
POINCARÉ : Œuvres
171-9 t. I Équations différentielles . . . . . 80 €
172-6 t. II Fonctions fuchsiennes . . . . . 93 €
173-3 t. III Équations différentielles. Théorie des fonctions . . . . . 90 €
174-0 t. IV Théorie des fonctions . . . . . 96 €
175-7 t. V Algèbre. Arithmétique . . . . . 84 €
176-4 t. VI Géométrie. Analysis situs (Topologie) . . . . . 75 €
177-1 t. VII Masses fluides en rotation. Principes de Mécanique analytique. Problème des trois corps . . . . . 87 €
178-8 t. VIII Mécanique céleste. Astronomie . . . . . 105 €
179-5 t. IX Physique mathématique . . . . . 108 €
180-1 t. X Physique mathématique . . . . . 96 €
181-8 t. XI Mémoires divers + Le Livre du Centenaire . . . . . 102 €
223-5 POISSON : Recherches sur la probabilité des jugements en matière criminelle et en matière civile . . . . . 64 €
049-1 POLYA : Comment poser et résoudre un problème . . . . . 34 €
294-5 POLYA : Les Mathématiques et le raisonnement "plausible" . . . . 60 €
132-0 PONCELET : Traité des propriétés projectives des figures (2 vol.) . . . . . 150 €
169-6 o PRIGOGINE : Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles . . . . . 20 €
309-6 REECH : Cours de Mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps . . . . . 60 €

082-8 o RÉNYI : Calcul des probabilités . . . . . 48 €
076-7 RIEMANN : Œuvres mathématiques . . . . . 65 €
078-1 RIESZ - SZ.-NAGY : Leçons d'analyse fonctionnelle . . . . . 65 €
133-7 RONCHI : Histoire de la lumière . . . . . 50 €
136-8 o ROUCHÉ - de COMBEROUSSE : Traité de géométrie (2 vol. en 1) . . . . . 105 €
048-4 SCHRÖDINGER : Mémoires sur la Mécanique ondulatoire . . . . 42 €
031-6 o SERRET : Cours d'Algèbre supérieure (2 vol.) . . . . . 120 €
092-7 o SERRET : Traité de Trigonométrie rectiligne et sphérique . . . . 35 €
208-2 SIERPINSKI : Leçons sur les nombres transfinis . . . . . 49 €
142-9 SIERPINSKI : 250 problèmes de théorie élémentaire des nombres . . . . . 43 €
097-2 o SOURIAU : Calcul linéaire (2 vol. en 1) . . . . . 42 €
318-8 SOURIAU : Géométrie et Relativité) . . . . . 78 €
321-8 SOURIAU : Structure des systèmes dynamiques . . . . . 69 €
264-8 STUDY - CARTAN : Nombres complexes . . . . . 33 €
306-5 TAIT : Traité élémentaire des quaternions (2 vol.) . . . . . 120 €
316-4 N TANNERY J. : Introduction à la théorie des fonctions d'une variable (2 vol.) . . . . . 150 €
034-7 TANNERY P. : La géométrie grecque . . . . . 27 €
033-0 TANNERY P. : Pour l'histoire de la science hellène . . . . . 63 €
182-5 TANNERY P. : Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne 54 €
TANNERY P. : Mémoires scientifiques
183-2 t. I Sciences exactes dans l'antiquité . . . . . 67 €
184-9 t. II Sciences exactes dans l'antiquité . . . . . 78 €
185-6 t. III Sciences exactes dans l'antiquité . . . . . 61 €
186-3 t. IV Sciences exactes chez les Byzantins . . . . . 65 €
187-0 t. V Sciences exactes au moyen âge . . . . . 58 €
188-7 t. VI Sciences modernes (Siècle de Fermat et Descartes) . . . 87 €
295-2 TARSKI : Introduction à la logique . . . . . 50 €
255-6 TCHEBYCHEF : Œuvres (2 vol.) . . . . . 215 €
162-7 TEIXEIRA : Courbes spéciales remarquables planes et gauches (3 vol.) . . . . . 181 €
029-3 TISSERAND : Traité de Mécanique céleste (4 vol.) . . . . . 288 €
061-3 VALIRON : Cours d'Analyse mathématique. Équations fonctionnelles. Applications . . . . . 71 €
325-6 Van der WAALS : La continuité des états gazeux et liquide . . . 54 €
204-4 VERRIEST : Leçons sur la théorie des équations selon Galois + Évariste Galois et la théorie des équations algébriques (2 titres en 1 vol.) . . . . . 56 €
224-2 VILLAT : Mécanique des fluides . . . . . 45 €
320-1 VOLTERRA : Leçons sur les équations intégrales et les équations intégro-différentielles . . . . . 38 €
322-5 VOLTERRA : Leçons sur les fonctions de lignes . . . . . 50 €
066-8 VOLTERRA : Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie . . . . . 35 €
323-2 VOLTERRA - PÉRÈS : Leçons sur la composition et les fonctions permutables . . . . . 42 €
263-1 VOSS - E. et F. COSSERAT : Principes de la Mécanique rationnelle . . . . . 45 €

o = oblong

Envoi dès réception du règlement (chèque ou carte bancaire)

CCP Paris 1 588 86 H Frais d'expédition : Europe : 6€ le 1er vol. + 3€ par vol. suppl. - Autres pays : 7€ par vol. TVA FR 06 341 842 839

POUR LA

La sélection SCIENCE

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité

NOUVEAUTÉ

Le plus grand des hasards
Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 ● 224 p. ● 20,00 €

Les déchiffreurs
Voyage en mathématiques

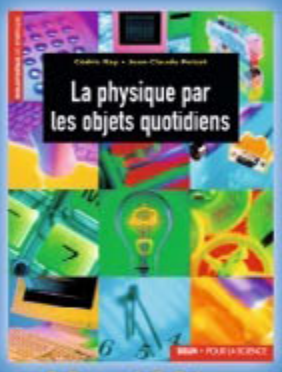
Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 ● 208 p. ● 20.00 €

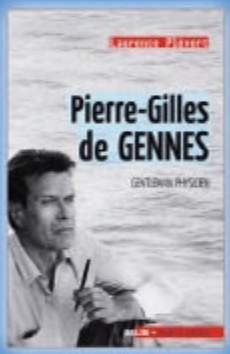
Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

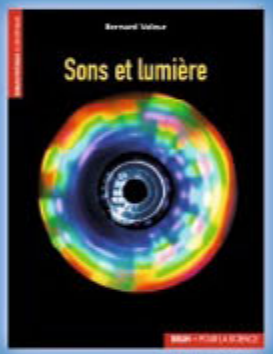


C. Ray et J.-C. Poizat
978-2-7011-4552-5 ● 160 p. ● 23,50 €

G. Pietryk
978-2-7011-3972-2 ● 304 p. ● 27,50 €



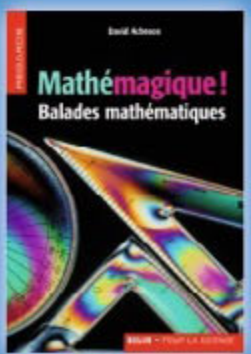
L. Plévert
978-2-7011-5228-8 ● 368 p. ● 23,00 €



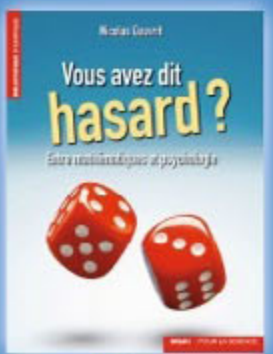
B. Valeur
978-2-7011-4751-2 ● 160 p. ● 23,90 €

J.-P. Delahaye
978-2-8424-1825-0 ● 224 p. ● 24,00 €

J.-P. Delahaye
978-2-8424-5090-8 ● 192 p. ● 24,00 €



D. Acheson
978-2-7011-4285-2 ● 176 p. ● 18,50 €



N. Gauvrit
978-2-7011-4622-5 ● 240 p. ● 25,00 €

Philippe Boulanger

Les paradoxes temporels

Ils résultent notamment de l'impossibilité de voyager dans le futur ou le passé, de l'irréversibilité du temps, et de sa division à l'infini.

Il est difficile de méditer sur le temps sans ressentir avec acuité les limites de notre intelligence, car le temps a ses caractéristiques évanescentes qui estompent notre compréhension. Nous ne mesurons pas ce que le temps est, mais ce qu'il fait devenir, comment notre environnement change « avec le temps ». Marie Bonaparte, arrière-petite nièce de l'empereur et l'une des premières psychanalystes françaises, exprimait cela dans un chiasme : « Ainsi, le temps me fait et je fais le temps. »

Longtemps les échelons du temps ont été astronomiques, la longueur du jour, du mois lunaire, d'une année. Aussi l'imagination concevait-elle difficilement des durées plus importantes. Il a fallu que l'on sache mesurer des désintégrations atomiques extrêmement lentes pour que l'on puisse évaluer des durées plus longues, des temps de l'ordre de l'ancienneté du monde. Notons qu'à mesure que l'on perfectionnait les mesures des temps longs, la Terre vieillissait : aujourd'hui les mesures convergent vers 4,55 milliards d'années. On peut penser que notre Terre ne vieillira plus beaucoup.

Le temps peut-il varier ? Comme nous mesurons les variations des choses par rapport au temps, avec quelles unités pourrions-nous mesurer les changements de l'écoulement du temps ? L'évolution du temps par rapport à lui-même suggère un écoulement invariable. Et si le temps variait, pourrions-nous le savoir ? Qu'adviendrait-il si tout à coup une seconde durait le double ? Que remarquerions-nous ? Rien semble-t-il, selon les physiciens ! Notons que le doublement des longueurs, contrairement au doublement du temps, serait visible, car les aires seraient multipliées par quatre et les volumes (donc les masses) par huit : de nombreux monuments s'écrouleraient à cause de l'augmentation de la pression sur les structures. Et si le temps s'arrêtait et si l'Univers se figeait, le remarquerions-nous ? Non, car la mécanique quantique indique que notre seule observation ferait repartir le temps !

Les ouvrages de fiction ont rêvé que le temps pouvait changer pour certaines personnes comme la Belle au bois dormant ou Rip Van Winkle ; Dieu a arrêté le Soleil pour que Josué puisse battre les Amoréens.

Tout cela n'était que légendes et rêveries jusqu'à la relativité restreinte d'Einstein, il y a un siècle. Pour préserver le déroulement de la causalité, où la cause précède toujours l'effet, il fallait une vitesse limite et finie à tout phénomène (si la vitesse était infinie, la cause coïnciderait avec l'effet et n'en pourrait se distinguer). La vitesse limite de propagation de la cause fut, à défaut de plus vraisemblable, la vitesse des particules de masse nulle, sans inertie : les photons. Mais alors on ne pouvait ajouter de vitesse à cette vitesse, et les rapports des longueurs et du temps devaient être modifiés en conséquence. Le temps s'écoulait plus lentement à l'approche de la vitesse de la lumière.

Ce qui introduisit le paradoxe des jumeaux, dit encore du voyageur de Langevin : un voyageur partant de la Terre et se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière vieillirait moins vite que son jumeau sédentaire et, à son retour sur Terre, retrouverait donc son frère beaucoup plus vieux que lui. Comme le jumeau sur Terre pourrait tenir le même raisonnement puisque, pour son jumeau voyageur, il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière, ils seraient, semblait-il, tous les deux plus jeunes que l'autre… Le paradoxe n'est que psychologique, car le jumeau qui a voyagé ne s'est pas déplacé à vitesse constante, de sorte que le calcul doit être modifié. Le jumeau qui aurait fait l'aller-retour en fusée serait vraiment plus jeune.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

L'ESSENTIEL

- Le temps est source de paradoxes et de nombreux récits de science-fiction.
- Les voyages dans le temps permettent aux auteurs d'imaginer des situations impossibles.
- L'infini, la réversibilité, l'immortalité sont autant de questions qui donnent naissance à des paradoxes temporels.

© Shutterstock/Paul Hill

Il n'empêche, le pas avait été franchi : l'écoulement du temps pouvait varier. Avec la théorie de la relativité générale, Einstein montra que la force de gravitation modifie aussi le temps et que vous vieillissez un peu plus vite au grenier qu'au sous-sol où la plus grande proximité (relative) du centre de la Terre augmente la force de gravitation et diminue la fréquence des battements de l'horloge mesurant le temps.

Changez le passé : le présent et le futur seront détruits

L'écoulement du temps, ralenti pour certains, équivaut ainsi à un voyage vers le futur chez les autres. Bien que les temps relativistes impliqués, par leur petitesse, n'aient pas l'attrait de *La Machine à explorer le temps* de H. G. Wells, ils n'en sont pas moins réels et le voyageur dont le temps s'écoule lentement peut voir le futur de l'autre. Imaginons qu'une prémonition, fondée sur une information venant d'un bref voyage vers l'avenir, nous permette de voir un événement horrible et de prendre des mesures pour contrer ce destin fatal : si l'avenir se révèle alors radieux sans la catastrophe évitée, quel crédit accorder à la sombre intuition d'un sort contraire, puisque celui-ci n'aura finalement pas lieu ? « Si c'est vrai, c'est faux » : on reconnaît là une version prévisionnelle du paradoxe du menteur.

Les voyages vers le passé entraînent des paradoxes plus prenants que les voyages vers le futur. Supposons qu'enfourchant notre machine, nous voyagions vers le passé. Le premier paradoxe est que la machine pourrait être connue par les habitants du passé et cette connaissance serait ineffaçable : la machine ne pourrait plus être découverte ultérieurement. Il est facile d'en tirer un argument contre l'existence des voyages dans le passé : si leur technique était découverte dans le futur, elle serait appliquée et déjà connue dans les rivages du passé temporel explorés. Aussi les habitants du passé visité pourront construire leurs propres machines à remonter le temps… et ainsi de suite : nous devrions les avoir vus, nos ancêtres aussi.

Lors des randonnées dans le passé, celui-ci pourrait être modifié et les modifications du passé auraient des conséquences notables et inattendues. Le filon a été exploité par les auteurs de science-fiction, notamment René Barjavel dans *Le voyageur imprudent* où le héros voulant tuer Bonaparte commence par tuer un garde, qui n'est autre que son grand-père. Comme son grand-père meurt avant d'avoir eu un fils, et donc un petit-fils, le héros ne peut avoir vécu et ne peut avoir voyagé dans le temps pour tuer son grand-père, lequel a pu avoir un petit-fils, etc. On ne peut échapper à cette boucle logique inextricable qu'en envisageant des bifurcations dans l'Univers, celui-ci se dédoublant dès le début du voyage dans le passé. Dans la bifurcation habituelle, le grand-père survit, dans une autre, il meurt et le héros n'existe plus. Quand vous changez le passé, vous détruisez le présent et le futur.

Un paradoxe alternatif du voyage « légal » vers le passé est la suppression du futur. S'il ne veut pas modifier le passé, un individu voyageant à rebours dans le temps devra retrouver sa vie d'autrefois et chausser les bottes qu'il portait quand il était plus jeune. Il revit alors la même vie jusqu'au moment où il a décidé le voyage vers le passé… qu'il accomplit ; ainsi il s'enferme dans une boucle sans fin et tout son environnement avec lui. Le voyage dans le passé interdirait ainsi tout futur, s'il n'y avait la pirouette, peu

L'AUTEUR

Philippe BOULANGER,
ancien directeur de la rédaction de *Pour la Science*, a publié un livre consacré aux paradoxes.

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Kantor et L. Graham,
Au nom de l'infini,
Belin-Pour la Science,
coll. Regards, 2010.

J.-P. Delahaye,
Au pays des paradoxes,
Belin-Pour la Science,
coll. Regards, 2e édition, 2010.

Ph. Boulanger et A. Cohen,
Le trésor des paradoxes,
Belin, 2007.

convaincante, car *ad hoc*, du dédoublement de l'Univers. Finalement, le meilleur argument contre les voyages dans le temps consiste à dire qu'il ne peut y avoir de contradictions dans le monde : comme les voyages dans le temps aboutissent à des contradictions, ils ne peuvent exister.

Ce raisonnement est renversé dans la théorie des trous de ver qui relient un trou noir (lequel absorbe toute matière) et un trou blanc (lequel expulse toute matière) ; un voyage vers le passé résulterait de ce passage. Pour éliminer les effets sur le passé, toute chose peut passer à travers le trou de ver avec la restriction que les conditions du passage lui interdisent de modifier le passé de façon qu'il ne puisse pas passer par le trou de ver… La boîte de Pandore est définitivement refermée par cet artifice : les voyages dans le temps sont permis, sauf ceux qui en interdisent l'existence.

Passionné par ce thème, l'écrivain scientifique américain Martin Gardner montra la nature intrinsèquement paradoxale d'un « téléphone tachyonique », où l'information serait véhiculée à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Supposons que deux personnes A et B se téléphonent par l'intermédiaire de ces tachyons : quand A reçoit un message de B, il répond immédiatement. B promet d'envoyer un message pour A à trois heures de son temps si – et seulement si – il n'a pas reçu un message de A avant deux heures. Mais les messages remontent le temps : si B envoie son message à trois heures, la réponse de A pourrait lui parvenir avant deux heures, alors l'échange de messages n'aura lieu que s'il n'a pas lieu, et réciproquement : le téléphone est un « antitéléphone » où les réponses précèdent les questions ! De même, dans un téléviseur tachyonique, les films passeraient à l'envers. En toute rigueur, ces raisonnements ne prouvent pas formellement l'inexistence des tachyons, mais plaident contre leur utilisation comme supports de communication : « On ne peut pas envoyer de télégrammes dans le passé » avait résumé Albert Einstein.

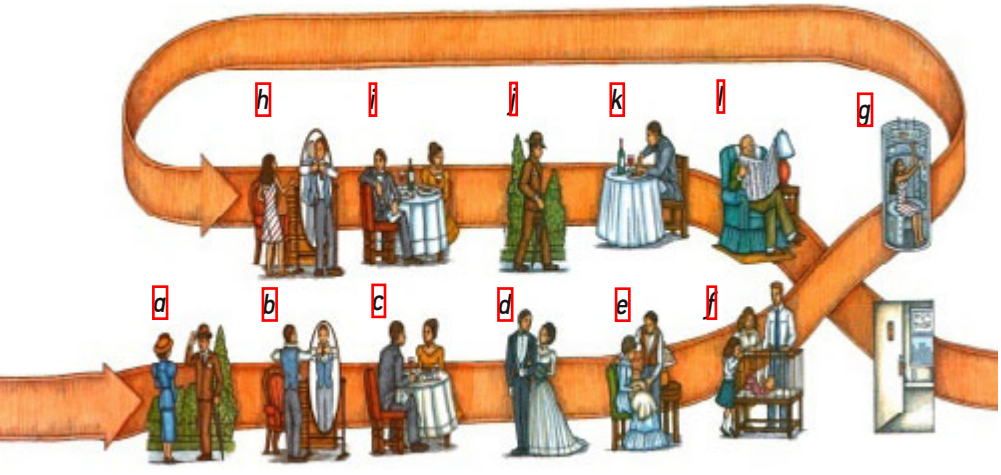
Achille et la tortue

Le logicien Bertrand Russell s'intéressa beaucoup au paradoxe d'Achille et de la tortue. Achille part après la tortue, mais, comme il court plus vite, il franchit la distance qui le séparait de la tortue au départ. Pendant ce temps, la tortue a parcouru une petite distance que le bouillant Achille s'empresse de franchir, et ainsi de suite. Ainsi chaque fois qu'Achille atteint l'endroit où la tortue se trouvait, elle a continué à avancer. La logique semble indiquer qu'Achille ne rattrape jamais la tortue, ce que l'expérience contredit évidemment. De surcroît, si Achille rattrapait la tortue, dans la suite infinie d'étapes « pensées », il y aurait un dernier terme où Achille atteindrait la tortue, ce qui est aussi paradoxal, une série infinie n'ayant pas de dernier terme.

Pour parcourir une distance, nous devons traverser une infinité de distances, ce qui semble impossible. Une solution serait d'affirmer qu'il existe une unité de temps indivisible, le chronon. Au-dessous de cet intervalle, un photon ne peut s'engager dans une quelconque interaction (la vitesse de la lumière étant grande, mais *finie*) : comment, en effet, parler de temps alors qu'il ne peut rien se passer ?

Si la distance entre Achille et la tortue n'est pas sécable à l'infini, il y a une dernière étape, quand Achille n'est distant de la tortue que d'un chronon fois sa vitesse. Dans un ultime effort, qui ne lui coûte presque rien, le roi des Myrmidons franchit d'un coup l'ultime étape et rattrape la tortue. Hélas pour cette explication à la Démocrite, il n'y a pas d'expérience physique qui impose l'existence d'un chronon…

Serait-il impossible de résumer une activité humaine à un ensemble de préceptes logiques ? Nous ne pouvons évi-



1. LES VOYAGES DANS LE TEMPS pourraient interdire au futur de se dérouler comme il le devrait. Supposons la rencontre de deux jeunes gens *(a)*. Ils se plaisent, se marient et ont une fille *(b à e)*. Cette dernière a elle-même une fille *(f)* qui entreprend un voyage dans le temps *(g)*. Elle rencontre son grand-père *(h)*, mais ils ne se plaisent pas *(i)*. Le grand-père reste célibataire et n'a pas d'enfants ni de petits-enfants *(j à l)*. Ce dénouement est paradoxal, puisque le grand-père a eu une petite-fille. Il l'aurait été tout autant si le grand-père avait épousé sa petite-fille !

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

demment accepter cette impossibilité. Nous pouvons seulement nous inquiéter sur le nombre de raisonnements erronés et apparemment logiques, analogues au paradoxe d'Achille, qui sont disséminés dans la littérature.

L'immortalité est difficilement testable, car il faudrait un temps infini pour la confirmer. Ainsi l'immortalité de la lignée de l'homme ne peut être qu'invalidée : si la lignée est mortelle nous le saurons, mais pas si elle est immortelle. De même, il faudrait un temps infini pour tester l'absolu pouvoir d'une fontaine de jouvence. Ce qui peut tromper un optimiste mesuré, d'où ce distique d'un humoriste :
« S'il était un pays où l'on vive toujours,
J'irais tranquillement pour y finir mes jours. »

Zénon d'Élée inventa un avatar du paradoxe d'Achille montrant que tout mouvement était impossible : une flèche pour atteindre son but doit parcourir la moitié de la distance qui l'en sépare, puis la moitié de la moitié, puis… Une infinité de distances doivent être parcourues en un temps fini.

Ce paradoxe illustre ce que le philosophe James Thomson désigne par une supertâche. Il a inventé un exemple frappant : imaginons avec lui qu'une lampe reste allumée une minute, éteinte une demi-minute, rallumée un quart de minute, et ainsi de suite indéfiniment. La série (1+ 1/2 + 1/4 + 1/8 +…) converge vers deux minutes. Les allumages ont une fin et l'on s'attend donc à ce que la lampe soit allumée ou éteinte, après ce cycle d'allumages et d'extinctions successifs. Mais l'état de la lampe est indécidable, car il est impossible de préciser si l'interrupteur se trouve ou non enclenché au terme d'un nombre infini de poussées, vu qu'il n'existe pas de dernière poussée !

Certains philosophes, en particulier Paul Benacerraf, affirment que l'apparente contradiction résulte d'une information insuffisante, tout comme le texte de la pièce de Molière, *Le malade imaginaire*, ne nous informe pas si Molière est gaucher ou droitier.

Il serait avantageux d'utiliser une machine à la Thomson pour calculer les décimales de π. En une seconde, nous déterminerions la première décimale de π, en une demi-seconde, la deuxième et ainsi de suite. En deux secondes, nous aurions calculé l'infinité des décimales…

Il existe bien des exemples de tâches infinies. Citons-en deux autres.

Dans la triste histoire de Tristram Shandy, celui-ci consacre une année à écrire l'histoire de la première journée de sa vie ; une autre année à écrire celle de la deuxième journée et ainsi de suite… Si Shandy est mortel, le travail restera évidemment inachevé. S'il est immortel, Shandy a un temps infini et aucune partie de sa vie ne restera à l'état de projet, car, à chaque jour, correspond une année d'écriture, mais le retard s'accumulera indéfiniment.

Le paradoxe du mathématicien John Edensor Littlewood (1885-1977) est plus agressif : nous avons une urne, pouvant contenir une infinité de billes, où nous plaçons, au temps zéro, 10 billes numérotées de 1 à 10 et nous prélevons la bille 1. Après une demi-seconde, nous répétons la même opération, nous ajoutons les billes numérotées de 11 à 20 et prélevons la bille numérotée 2 et ainsi de suite pour tous les temps de la série 1, 1/2, 1/4, 1/8, etc. Combien restera-t-il de billes dans l'urne après deux secondes ? Selon un raisonnement, il y en aura une infinité, car nous aurons ajouté neuf billes une infinité de fois. Selon un autre mode de pensée, il ne reste plus aucune bille, car toute bille numérotée n disparaît à l'instant $t = 1 - 1/2^{n-1}$.

L'impossible réversibilité

Quand Boltzmann énonça que l'entropie d'un système isolé croissait avec le temps de façon irréversible, son collègue Loschmidt formula le paradoxe qui allait porter son nom : « Les équations qui gouvernent les évolutions des particules d'un système mécanique sont symétriques par rapport au temps. Comment peut-on prétendre qu'elles conduisent à des lois irréversibles ? Tout système qui a évolué de l'ordre vers le désordre doit pouvoir être réordonné simplement en renversant la quantité de mouvement de chaque particule, sans rien changer à l'énergie du système. » Boltzmann répondit qu'il était bien difficile de renverser toutes les quantités de mouvement en même temps. Des expériences actuelles ont réalisé ce fait d'armes, mais dans des conditions assez peu naturelles…

La réponse physique classique au paradoxe de Loschmidt s'appuie sur le caractère très improbable des réactions en théorie réversibles. Quand on mélange du lait et du café, il ne faut plus compter sur leur séparation soudaine ; quand un objet fragile se brise, il n'a guère de chance de se reformer par réunion spontanée de ses morceaux ; et les cendres ne reconstituent pas les arbres brûlés : l'asymétrie statistique de ces réactions induirait celle de l'écoulement du temps.

© Roy McMahon/Corbis

2. SELON LE PARADOXE DES JUMEAUX, si un frère voyageait dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière, il vieillirait moins vite que son jumeau resté sur Terre.

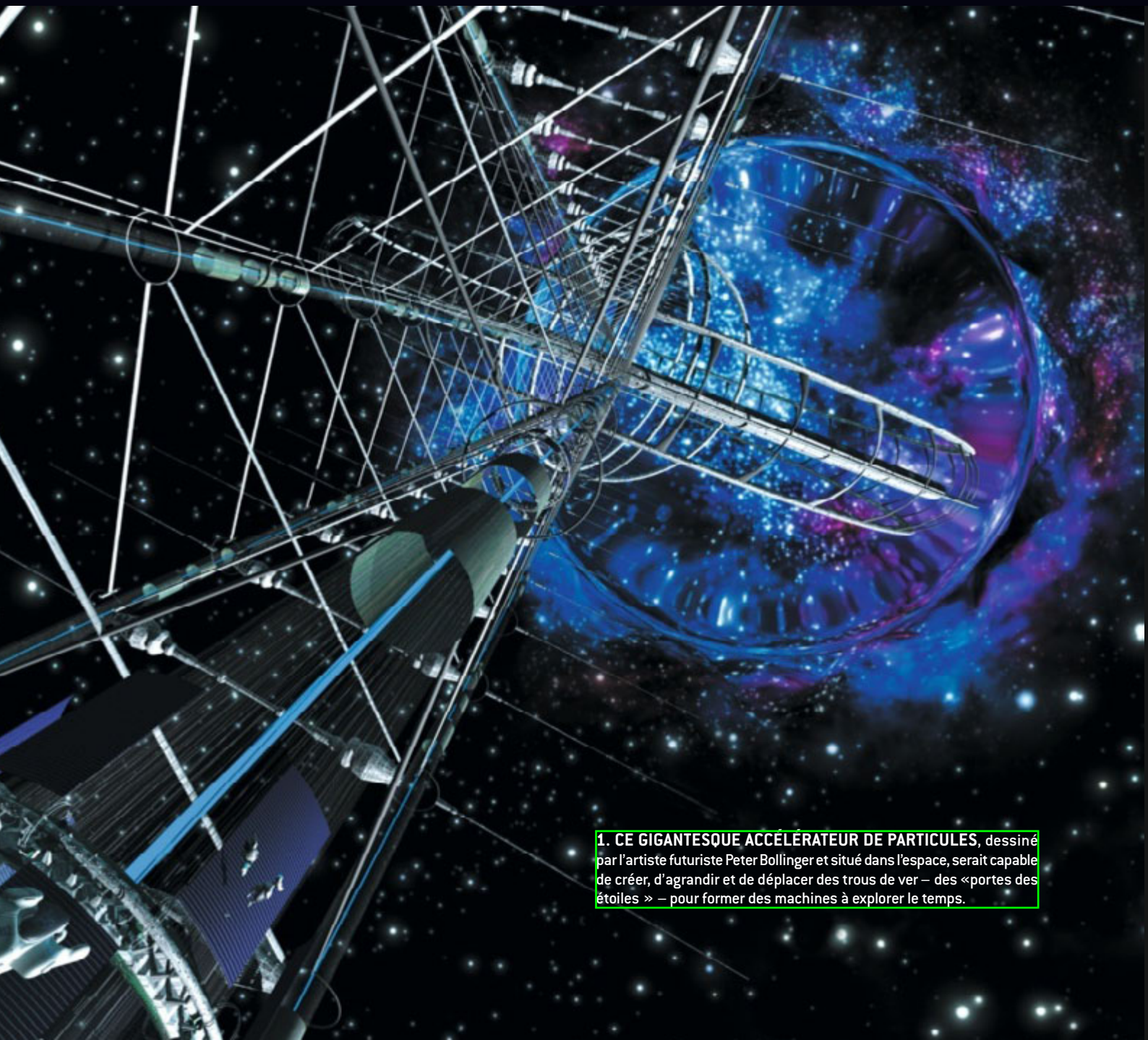
Poincaré a montré que tout système revient à un état proche de son état initial, mais le temps d'attente, jamais infini, peut dépasser l'âge de l'Univers… La réversibilité n'est pas constatée, car elle demande des temps de récurrence trop longs : si nous voulions voir le café au lait se séparer, il faudrait une patience… infinie. L'écrivain argentin Jorge Luis Borges l'avait déjà dit : « Les immortels ont tout le temps nécessaire pour accomplir le travail qu'il leur faut faire, aussi ne font-ils rien. » Nous ne sommes pas immortels, c'est pourquoi nous nous passionnons pour l'immortalité, les infinis de l'Univers, du temps et de ses paradoxes.

Notre sensation du temps est de l'ordre du « bon sens », ce qui, nous le savons, n'est pas satisfaisant en science, d'où les paradoxes. L'humanité a tout le temps pour résoudre les paradoxes du temps : il a fallu 300 ans pour que le paradoxe énoncé par Galilée (il y a deux fois plus de nombres entiers que de nombres pairs, mais comment un ensemble infini peut-il inclure un autre ensemble infini ?) soit expliqué par Cantor et que celui-ci ordonne les paradoxes des infinis. Soyons studieux et patients : le temps travaille pour nous. ■

Physique théorique

Peut-on créer une machine à remonter le temps ?

Paul Davies



1. CE GIGANTESQUE ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES, dessiné par l'artiste futuriste Peter Bollinger et situé dans l'espace, serait capable de créer, d'agrandir et de déplacer des trous de ver – des «portes des étoiles » – pour former des machines à explorer le temps.

Depuis que l'auteur britannique Herbert George Wells a écrit son célèbre roman *La Machine à explorer le temps* en 1895, le voyage dans le temps est un thème de science-fiction très populaire. Mais est-il vraiment possible ? Peut-on construire une machine qui transporterait un être humain dans le passé ou le futur ?

Pendant des décennies, le voyage dans le temps était hors de portée de la science. Cependant, ces dernières années, le sujet est devenu une activité ludique des physiciens théoriciens : ils s'y livrent notamment par jeu, car il est amusant de réfléchir au voyage dans le temps. Mais ce travail reste tout de même sérieux : comprendre la relation entre la cause et l'effet est une composante clef des tentatives de construction d'une théorie unifiée de la physique. Si le voyage dans le temps, sans aucune limitation, était possible, même en principe, la nature d'une théorie unifiée serait remise en cause.

Si l'on arrivait à fabriquer une sorte de « porte des étoiles », on voyagerait dans le temps. Les nouveaux accélérateurs de particules en seraient presque capables, à l'échelle subatomique.

Avant les théories de la relativité d'Albert Einstein, on pensait souvent que le temps était absolu et universel, c'est-à-dire le même pour tous quelles que soient les circonstances. Dans sa théorie de la relativité restreinte, Einstein propose que l'intervalle mesuré entre deux événements dépende de la façon dont l'observateur évolue. Ainsi, deux observateurs dont les vitesses diffèrent ne ressentent pas les mêmes durées entre deux événements.

On décrit en général cet effet avec le paradoxe des jumeaux. Supposez que Sam et Sally soient jumeaux. Sally embarque dans une fusée et voyage à très grande vitesse jusqu'à une étoile proche, fait demi-tour et revient sur Terre, tandis que Sam reste à la maison. Pour Sally, le voyage a duré un an. Mais quand elle revient, son frère a neuf ans de plus qu'elle. Sally et Sam n'ont plus le même âge, bien qu'ils soient nés le même jour : en fait, Sally a fait un bond de neuf années dans le futur de la Terre.

Cet effet, nommé dilatation des durées, se produit quand deux observateurs se déplacent l'un par rapport à l'autre. Dans la vie quotidienne, on ne remarque pas ces distorsions du temps, car elles deviennent importantes seulement quand le mouvement se fait à une vitesse proche de celle de la lumière. Même à la vitesse des avions, la dilatation temporelle pendant un voyage classique se limite à quelques nanosecondes ! Néanmoins, les horloges atomiques sont assez précises pour enregistrer le décalage et confirmer que le temps s'étire vraiment sous l'effet du mouvement. Ainsi, le voyage dans le futur est une réalité avérée, même si pour l'instant, cela n'a jamais été très impressionnant *(voir la figure 2)*…

Pour observer des failles temporelles, il faut sortir du domaine de l'expérience ordinaire. Les particules subatomiques peuvent être propulsées à des vitesses proches de celle de la lumière dans les grands accélérateurs. Certaines de ces particules, tels les muons, ont une horloge intégrée, car elles se désintègrent avec une demi-vie connue ; en accord avec la théorie d'Einstein, on observe que la désintégration des muons est ralentie dans les accélérateurs.

Tordre l'espace-temps

En outre, certains rayons cosmiques subissent des distorsions temporelles spectaculaires. Ces particules se déplacent à une vitesse si proche de celle de la lumière que, de leur point de vue, elles traversent la galaxie en quelques minutes, même si dans le référentiel terrestre, elles semblent mettre plusieurs dizaines de milliers d'années. S'il n'y avait pas de dilatation du temps, certaines de ces particules (celles qui sont instables) n'arriveraient jamais sur Terre, car elles se désintégreraient bien avant.

La vitesse est une façon de faire un bond en avant dans le temps. La gravité en est une autre. Dans sa théorie de la relativité générale, Einstein prédit que la gravité ralentit le temps. Les pendules avancent plus vite dans l'espace qu'au sol. Cet effet est à nouveau minuscule, mais il a été mesuré directement grâce à des horloges

L'ESSENTIEL

✔ **Voyager vers le futur est conceptuellement assez simple. Si l'on s'approche de la vitesse de la lumière ou si l'on se trouve dans un fort champ gravitationnel, on ressent le temps plus lentement qu'autrui : autrement dit, on voyage dans son futur.**

✔ **Mais remonter dans le passé est plus difficile. La théorie de la relativité le permet dans certaines configurations de l'espace-temps, tel le trou de ver, c'est-à-dire un tunnel à travers l'espace et le temps – une « porte des étoiles ».**

✔ **Voyager dans le passé soulève quelques paradoxes causaux ; il serait pourtant possible de prendre part au passé.**

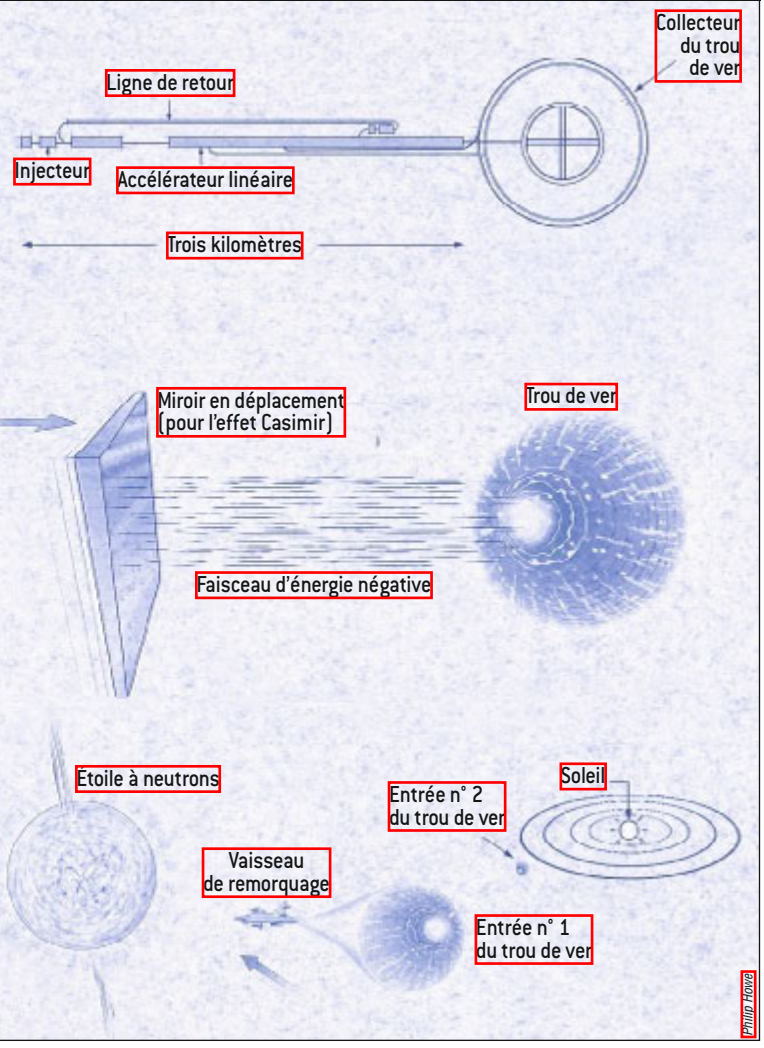
Peter Bollinger

VOYAGER AVEC LES TROUS DE VER EN TROIS ÉTAPES

1 TROUVER OÙ FABRIQUER UN TROU DE VER, c'est-à-dire un tunnel reliant deux endroits de l'espace. Il pourrait exister de gros trous de ver dans l'espace profond, qui seraient des reliques du Big Bang. Sinon, on pourrait se contenter de trous de ver de taille subatomique, soit naturels (dont on pense qu'ils apparaîtraient dans l'espace pour disparaître aussitôt), soit artificiels (produits par des accélérateurs de particules, *voir le dessin ci-contre*). Ces petits trous de ver devraient alors être agrandis pour devenir utilisables, peut-être avec des champs d'énergie semblables à ceux qui ont entraîné l'inflation de l'Univers après le Big Bang.

2 STABILISER LE TROU DE VER. L'énergie négative, produite par exemple par effet Casimir – dû aux fluctuations quantiques du vide –, permettrait à un signal ou à un objet de traverser en toute sécurité le trou de ver. L'énergie négative s'oppose à la tendance du trou de ver à rétrécir en un point de densité infinie ou quasi infinie. En d'autres termes, elle empêche que le trou de ver ne se transforme en un trou noir.

3 REMORQUER LE TROU DE VER. Un vaisseau spatial séparerait les entrées du trou de ver. Une des entrées serait située près de la surface d'une étoile à neutrons, une étoile extrêmement dense dotée d'un fort champ gravitationnel. Une telle gravité ralentit le temps. Puisque le temps s'écoule plus rapidement à l'autre entrée du trou de ver, les deux entrées seraient séparées non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.



ultraprécises (*voir l'article de Christophe Salomon*). D'ailleurs, on a pris en compte ce phénomène de distorsion du temps dans le système de géolocalisation GPS. Sans cela, les marins et les conducteurs de taxis par exemple se dirigeraient à des kilomètres de leur destination…

À la surface d'une étoile à neutrons – un astre composé surtout de neutrons et issu de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive –, la gravité est si forte que le temps est ralenti d'environ 30 pour cent par rapport au temps terrestre. Vus d'une telle étoile, les événements sur Terre ressembleraient à une vidéo légèrement accélérée. Le trou noir – un objet massif dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper – représente le summum de la distorsion du temps ; proche de sa surface, le temps est presque figé par rapport à celui de la Terre. L'intérieur du trou noir est au-delà de la fin des temps, pour l'univers extérieur au trou noir. Si un astronaute pouvait passer très vite près d'un trou noir et revenir sain et sauf (ce qui n'est guère plausible !), il ferait un grand saut dans le futur.

Retour dans le passé

Le voyage dans le futur semble donc possible. Qu'en est-il du retour en arrière ? Il est bien plus problématique. En 1948, Kurt Gödel, de l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey, a obtenu une solution aux équations du champ gravitationnel d'Einstein, qui décrivait un univers en rotation. Dans cet univers, un astronaute pourrait voyager dans l'espace pour atteindre son passé. Cela découle de la façon dont la gravité modifie la lumière. La rotation de l'univers entraînerait la lumière (et par conséquent les relations causales entre objets), permettant à un objet de voyager en une boucle fermée dans l'espace qui soit aussi une boucle fermée dans le temps, sans dépasser la vitesse de la lumière dans le voisinage immédiat de la particule.

Bien qu'aucune observation ne montre que l'Univers dans son ensemble soit en rotation, la solution de Gödel prouve que le retour dans le passé n'est pas interdit par la théorie de la relativité. Et Einstein lui-même admit l'idée que sa théorie permettrait le voyage dans le passé dans certaines circonstances.

Puis on a trouvé d'autres scénarios permettant le voyage dans le passé. Par exemple, en 1974, Frank Tipler, de l'Université Tulane en Louisiane, a calculé qu'un cylindre massif infiniment long tournant sur son axe à une vitesse proche de celle de la lumière permettrait aux astronautes

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

de visiter leur passé, là encore en entraînant la lumière autour du cylindre en une boucle. En 1991, Richard Gott, de l'Université de Princeton, a prédit que les cordes cosmiques – des structures dont les cosmologistes pensent que certaines auraient pu être créées aux premiers stades du Big Bang – produiraient des résultats similaires. Mais c'est au milieu des années 1980 que le scénario le plus réaliste de machine à remonter le temps a émergé : il est fondé sur le concept de trou de ver.

La « porte des étoiles »

En science-fiction, les trous de ver sont nommés « portes des étoiles » ; ils forment un raccourci entre deux points de l'espace-temps très éloignés. En sautant dans un hypothétique trou de ver, on ressortirait quelques instants plus tard à l'autre bout de la galaxie. Les trous de ver s'insèrent dans la théorie de la relativité générale, selon laquelle la gravité ne courbe pas seulement le temps, mais aussi l'espace. La théorie suggère que deux points de l'espace peuvent être reliés par des itinéraires alternatifs semblables à des routes et des tunnels. De même qu'un tunnel passant à travers une colline peut être plus court qu'une route construite à sa surface, un trou de ver peut être plus court que l'itinéraire classique dans l'espace ordinaire. Beaucoup plus court même.

En 1985, l'astronome américain Carl Sagan utilise le trou de ver comme dispositif de fiction dans son roman *Contact*. Inspirés par ce scénario, Kip Thorne et ses collègues, de l'Institut de technologie de Californie, ont entrepris de déterminer si les trous de vers étaient compatibles avec les lois de la physique. Leur point de départ était qu'un trou de ver ressemblerait à un trou noir en cela que ce serait un objet ayant une énorme gravité. Mais contrairement au trou noir, qui offre un aller simple vers nulle part, un trou de ver disposerait d'une entrée et d'une sortie.

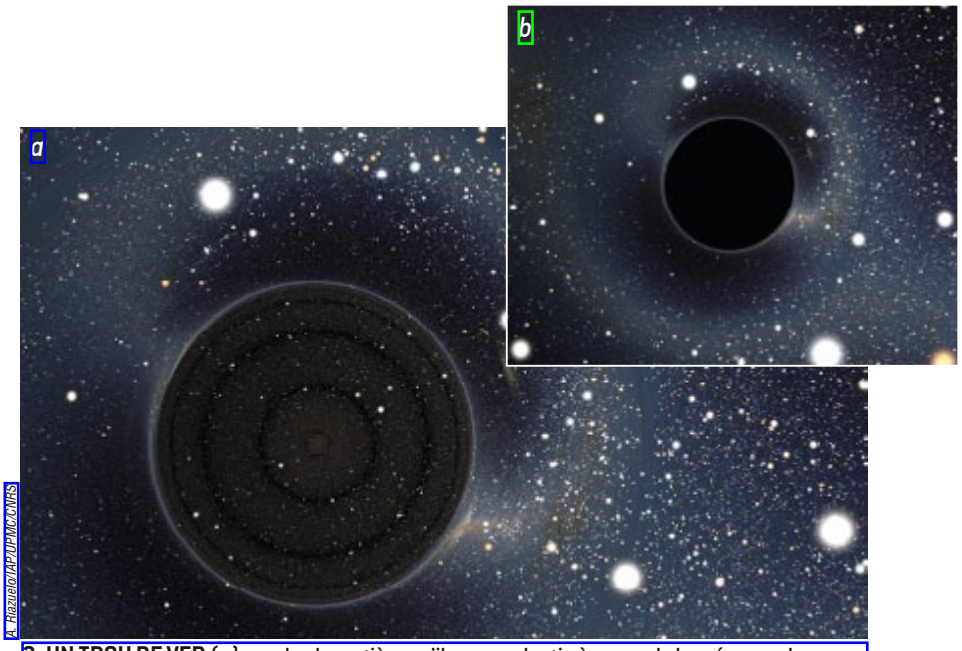
Pour que le trou de ver soit traversable, il doit contenir ce que K. Thorne appelle de la matière exotique, laquelle s'oppose à la tendance naturelle qu'a un système massif d'imploser en un trou noir sous l'effet de son poids. L'antigravité, ou répulsion gravitationnelle, pourrait être produite par une hypothétique énergie ou pression négatives.

Or certains pensent que les états d'énergie négative existent dans certains systèmes quantiques, ce qui suggère que la matière exotique de K. Thorne n'est pas exclue par les lois de la physique. Toutefois, il n'est pas certain que l'on puisse rassembler suffisamment de matière antigravitationnelle pour stabiliser un trou de ver.

C'est alors que K. Thorne et ses collègues ont compris que si un trou de ver stable était créé, il pourrait être transformé facilement en machine à remonter le temps. Un astronaute qui en traverserait un ressortirait non seulement ailleurs dans l'Univers, mais aussi à un autre moment, dans le futur ou dans le passé.

Pour adapter le trou de ver au voyage dans le temps, une de ses entrées serait placée près de la surface d'une étoile à neutrons. La gravité de l'étoile ralentirait le temps près de cette entrée, si bien qu'une différence de temps s'accumulerait progressivement entre les extrémités du trou de ver. Si celles-ci étaient installées dans des endroits adéquats de l'Univers, cette différence de temps serait fixée *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Supposez que la différence soit de dix ans. Un astronaute passant au travers du trou de ver dans une direction ferait un saut de dix années dans le futur, tandis qu'un astronaute passant dans l'autre sens sauterait dix ans en arrière. En retournant à son point de départ à grande vitesse dans l'espace ordinaire, le deuxième astronaute rentrerait à la maison avant même d'être parti. En d'autres termes, une boucle fermée dans l'espace deviendrait une boucle fermée du



2. UN TROU DE VER *(a)* expulse la matière qu'il a pu engloutir, à cause de la présence de masse ou d'énergie négatives en son sein. Même un rayon lumineux capturé par un trou de ver en ressort. Pour cette raison, la silhouette d'un trou de ver – contrairement à celle d'un trou noir *(b)* – n'est pas totalement sombre. Elle révèle la région de l'Univers d'où sont issus les rayons lumineux qui l'ont traversée. Cette région apparaît cependant distordue du fait du champ gravitationnel extrêmement intense qui règne dans un tel objet.

VÉHICULE	CARACTÉRISTIQUES	DÉCALAGE TEMPOREL CUMULÉ
Avion de ligne	920 kilomètres par heure pendant huit heures	10 nanosecondes (par rapport au référentiel lié au sol)
Sous-marin nucléaire	300 mètres de profondeur pendant six mois	500 nanosecondes (par rapport au niveau de la mer)
Étoile à neutrons	Décalage vers le rouge	Les intervalles de temps augmentent de 30 pour cent (par rapport à la Terre)
Neutron de rayon cosmique	10^{18} électronvolts	Durée de vie moyenne rallongée de 15 minutes à 30 000 ans

3. IL EST AUJOURD'HUI POSSIBLE DE VOYAGER DANS LE FUTUR : en voici quelques exemples ! Dans la vie quotidienne, on ne remarque pas les distorsions du temps – qui se produisent quand deux observateurs se déplacent l'un par rapport à l'autre –, car elles deviennent importantes seulement quand le mouvement se fait à une vitesse proche de celle de la lumière.

L'AUTEUR

Paul DAVIES est physicien théoricien au Centre australien d'astrobiologie de l'Université Macquarie, à Sydney.

temps. La seule limitation est que l'astronaute ne pourrait pas revenir à une époque antérieure à la construction du trou de ver.

Mais un problème empêche la construction d'une machine à voyager dans le temps : la création du trou de ver. De telles structures se faufilent peut-être déjà dans l'espace, en tant que reliques du Big Bang. En outre, les trous de ver pourraient naturellement apparaître à des échelles minuscules, de l'ordre de la longueur de Planck, c'est-à-dire 20 ordres de grandeur plus petits qu'un noyau atomique. En principe, un trou de ver si minuscule pourrait être stabilisé par une impulsion d'énergie, puis d'une façon ou d'une autre dilaté jusqu'à atteindre des dimensions utilisables.

Paradoxes temporels

Si tous les problèmes techniques étaient surmontés, la production d'une machine à voyager dans le temps ouvrirait la boîte de Pandore des paradoxes causaux. Par exemple, imaginez qu'un voyageur temporel visite le passé et tue sa mère encore enfant. Cela a-t-il un sens ? Si la fille meurt, elle ne peut pas devenir la mère du voyageur. Et si le voyageur n'est jamais né, il n'a pas pu retourner dans le passé et assassiner sa mère…

Les paradoxes de ce type surgissent quand le voyageur essaie de modifier le passé, ce qui est impossible, car si le passé change, l'existence même du voyageur est compromise : il ne peut donc pas avoir fait ce voyage. À moins d'imaginer que quelqu'un prenne part au passé pour assurer que le passé se déroule comme il l'a réellement fait *(voir l'encadré page ci-contre)*. Ainsi, la boucle causale reste cohérente et ne présente plus de paradoxe. La cohérence causale imposerait des limitations sur ce que le voyageur peut faire, mais elle n'interdit pas pour autant le voyage dans le temps.

Le retour dans le passé, s'il n'est pas paradoxal, n'en reste pas moins bizarre. Considérez le voyageur temporel qui saute d'un an en avant et lit un article sur un nouveau théorème mathématique. Il en

LE VOYAGE VERS LE FUTUR EST-IL VRAIMENT POSSIBLE ?

Sans cesse, nous voyageons vers le futur. C'est ce que nous nommons « l'écoulement du temps ». Mieux vaudrait dire que « nous nous écoulons dans le temps ». Le tragique de nos existences vient de l'absence de tout contrôle sur ce voyage temporel permanent vers le futur.

Mais les lois qui régissent ce voyage ne sont pas conformes à l'intuition, comme la théorie de la relativité l'exprime : la notion intuitive de durée séparant deux événements n'existe pas. Chaque « observateur » peut définir pour lui une durée propre, mais les durées propres des uns et des autres n'ont rien à voir, tout comme les durées de leur voyage vers le futur, qui ne se correspondent pas. Alors comment définir le « voyage vers le futur » ?

Soit il existe une notion que l'on peut qualifier de « temps » (c'est le cas en physique newtonienne), et le voyage temporel est impossible. Soit le temps n'existe pas (je veux dire par là un temps absolu) et l'on peut envisager des processus que l'on nommerait voyages vers le futur. C'est le cas en relativité générale qui autorise des « boucles de temps fermées ».

Imaginons une particule élémentaire qui décrit une telle boucle de temps fermée. Et considérons un événement A qui la concerne. Cet événement se situe à la fois dans son futur et son passé. À partir de cet événement A, le temps propre de la particule « s'écoule » vers ce qui représente pour elle son futur. Après une certaine durée de ce temps propre T (égale à la « longueur » de la boucle fermée dans l'espace-temps), la particule « vit » l'événement A. On aurait envie de dire « revit ». Mais en fait, l'événement n'est vécu qu'une seule fois, et donc de façon unique. On peut dire qu'une durée T du temps propre de la particule s'est écoulée entre l'événement A et… l'événement A. Tandis que pour moi (par exemple), aucune durée de mon temps propre ne s'est écoulée entre cet événement et lui-même.

Une telle situation est *a priori* possible selon la relativité générale. Qu'elle puisse se réaliser dans la pratique reste une question débattue. Une telle situation n'engendre pas de paradoxe. L'événement A (comme chaque autre événement de la boucle de temps fermée) n'est vécu qu'une seule fois. Même si l'on a l'impression que la particule « vit » l'événement A plusieurs fois, elle se retrouve « à chaque passage » dans la même situation. En particulier, elle ne conserve aucune mémoire de son passé (ni de son futur), car une particule reste de toute façon identique à elle-même.

Ainsi, du point de vue d'une particule élémentaire, l'écoulement de son temps propre n'a guère de pertinence. Il est déjà acquis que le « temps » a disparu *(voir l'article de M. Lachièze-Rey)*. Mais cela suggère que même la notion de « temps propre » est superflue et qu'une théorie plus complète pourrait s'en passer. En d'autres termes, une particule (isolée) ne dispose d'aucune horloge qui lui permettrait de suivre l'écoulement de son temps propre (si c'était le cas, elle constituerait avec cette horloge un système composite, ce qui correspond au cas ci-après).

Mais peut-on imaginer qu'un système plus complexe, voire un observateur (un cosmonaute), suive une boucle de temps fermée et appartienne à son propre futur ou passé ? Les choses se compliquent. Pour que le cosmonaute décrive une boucle de temps fermée, chacune des milliards de milliards de particules qui le compose devrait suivre cette boucle, et elles devraient conserver la cohésion qui fait qu'elles forment un cosmonaute. Or nous avons toutes raisons de penser que cela est impossible. Déjà, au voisinage d'un trou noir de dimensions convenables (par exemple fabriqué par l'homme), situation pourtant bien moins « extrême », un cosmonaute serait dissocié par des forces de marée.

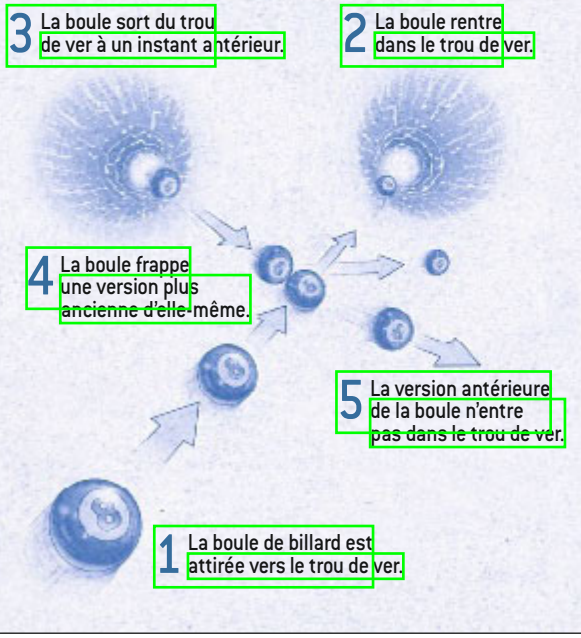
Ainsi, un système complexe, tel un cosmonaute, ne peut pas décrire une boucle de temps fermée. Or tous les paradoxes évoqués à propos des voyages dans le temps reposent sur le fait qu'un cosmonaute a une mémoire (voire une intentionnalité). Vraisemblablement, cette mémoire ne serait pas préservée dans un voyage temporel (tant pis pour les auteurs de science-fiction).

Marc Lachièze-Rey,
Astroparticule et cosmologie (UMR 7164),
Université Paris 7-Denis Diderot

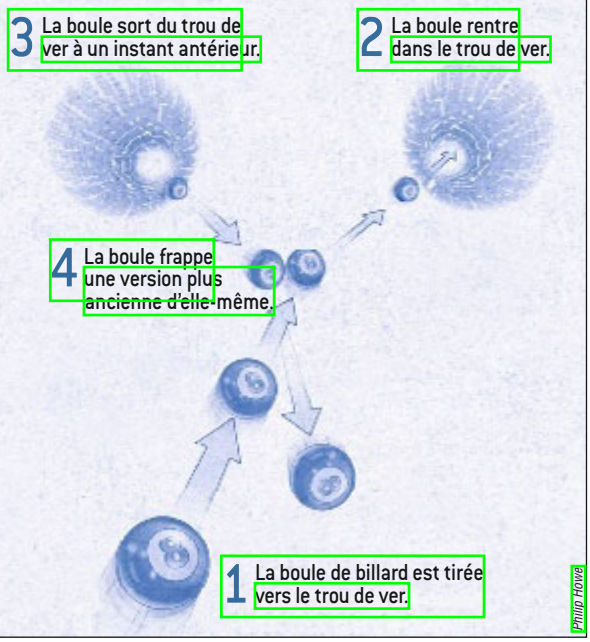
© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

MODIFIER LE PASSÉ EST SOURCE DE PARADOXES TEMPORELS

LE « PARADOXE ULTIME » apparaît quand des personnes ou des objets peuvent remonter le temps et modifier le passé. Une version simplifiée met en jeu des boules de billard. Une boule de billard passe dans un trou de ver faisant office de machine à remonter le temps. En émergeant, elle frappe la version antérieure d'elle-même, ce qui l'empêche de rentrer dans le trou de ver.



LA RÉSOLUTION DE CE PARADOXE repose sur un fait simple : la boule de billard doit respecter la logique et les lois de la physique. Elle ne peut pas traverser le trou de ver d'une façon qui l'empêchera de le traverser (à nouveau). Mais elle peut le faire d'une infinité d'autres façons.



note les détails, revient à son année de départ et enseigne le théorème à un étudiant, qui le rédige alors. L'article est, évidemment, celui-là même que le voyageur a lu. Une question se pose alors : d'où est venue l'idée du théorème ? Pas du voyageur temporel, puisqu'il a lu le théorème, mais pas non plus de l'étudiant, qui l'a appris du voyageur temporel. L'idée aurait surgi de nulle part, sans raison.

Protéger la chronologie

Ces conséquences insolites du voyage dans le temps ont conduit certains scientifiques à en rejeter la notion. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, a proposé une « conjecture de protection de la chronologie », qui interdirait les boucles causales… et les voyages dans le temps. Comme la théorie de la relativité autorise les boucles causales, la protection de la chronologie nécessiterait l'intervention d'un autre facteur pour empêcher le retour dans le passé. Quel serait ce facteur ?

Les processus quantiques pourraient offrir une solution. L'existence d'une machine à voyager dans le temps permettrait aux particules de revenir par boucle dans leur passé. Les calculs suggèrent que les perturbations qui suivraient s'autorenforceraient, créant une vague d'énergie incontrôlable détruisant le trou de ver.

La protection de la chronologie n'est pour le moment qu'une conjecture, et le voyage dans le temps reste une possibilité. Pour résoudre la question, il faudrait réussir à unifier la mécanique quantique et la gravitation, peut-être avec une théorie telle celle des cordes ou ses extensions. Il est même envisageable d'obtenir une preuve expérimentale des voyages temporels dans les années à venir ; le nouvel accélérateur de particules de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), le LHC *(Large Hadron Collider)*, serait capable de créer des trous de ver microscopiques, si certaines nouvelles théories sur la gravitation sont avérées. Même si ces trous de vers disparaissaient aussi vite qu'ils sont apparus, ils survivraient suffisamment longtemps pour que les particules exécutent d'éphémères boucles causales. On serait encore loin de la machine à voyager dans le temps de H. G. Wells, mais cela modifierait à jamais notre représentation de la réalité physique. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Davies, **Comment construire une machine à explorer le temps ?**, EDP Sciences, 2007.

J. R. Gott III, **Time travel in Einstein's universe : the physical possibilities of travel through time**, Houghton Mifflin, 2001.

K. S. Thorne, **Trous noirs et distorsions du temps : L'héritage sulfureux d'Einstein**, Flammarion, 2001.

L. Ford et T. Roman, **L'énergie négative**, *Pour la Science* n° 271, mai 2000.

P. J. Nahin, **Time machines : time travel in physics, metaphysics, and science fiction**, American Institute of Physics, 1993.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

L'Univers aux limites de

Alain Riazuelo

ESO/ Mario Nonino, Piero Rosati and the ESO GOODS Team

L'ESSENTIEL

- L'expansion cosmique dilue le contenu de l'Univers. Mais que va-t-il advenir à long terme des objets qui le peuplent ?
- Les étoiles et les planètes s'effaceront d'abord, avant que les galaxies ne se dispersent. Plus tard, les trous noirs eux-mêmes s'évaporeront.
- À très long terme, la matière pourrait se désintégrer entièrement.
- Autre possibilité : sur des échelles de temps incommensurables, seuls de petits agrégats de fer stables subsisteraient.

À première vue, l'histoire de l'Univers est bien connue. Les observations actuelles nous révèlent que l'Univers est en expansion, et qu'il était plus dense et plus chaud par le passé. Il est issu d'une phase extraordinairement dense et chaude, il y a environ 13,7 milliards d'années : le Big Bang. Les différentes observations astronomiques permettent de détailler la plupart des étapes de ce scénario avec une remarquable précision.

Moins d'une seconde après le Big Bang, l'antimatière avait disparu. Dans les trois minutes suivantes furent synthétisés les premiers noyaux atomiques qui, 380 000 ans plus tard, capturèrent les électrons pour former les premiers atomes. Quelques dizaines de millions d'années plus tard, les premières étoiles s'allumèrent. Puis ce fut le tour de notre Galaxie, qui s'est formée il y a environ dix milliards d'années, suivie par le Soleil il y a 4,5 milliards d'années. La vie unicellulaire apparut 700 millions d'années plus tard, puis la vie évoluée, les dinosaures, les mammifères, et enfin l'homme.

Fin de l'histoire ? Pas vraiment. Car l'Univers a encore de beaux jours – ou plutôt une longue nuit – devant lui. L'une des grandes questions de la cosmologie est celle du devenir de l'expansion de l'Univers. Selon les propriétés de son contenu matériel, les modèles indiquent que l'expansion cosmique se poursuivra indéfiniment ou au contraire s'arrêtera et cédera la place à une phase de contraction aboutissant à un « Big Crunch », sorte de Big Bang à l'envers.

Les observations actuelles indiquent que l'Univers est majoritairement empli d'une forme mystérieuse de matière, l'énergie sombre, qui provoque une accélération de l'expansion cosmique. Ainsi, tout porte à croire que l'expansion se poursuivra indéfiniment, si tant est que les propriétés de l'énergie sombre ne changent pas dans le futur. C'est dans ce cadre que nous allons passer en revue ce que pourraient être les événements marquants de l'histoire de l'Univers à très long terme.

Quelques dizaines ou centaines de millions d'années après le Big Bang, les premières étoiles ont illuminé le cosmos.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

l'éternité

Des étoiles aux amas de galaxies, rien dans l'Univers n'est éternel. Sur des échelles de temps démesurément longues, tous les objets que nous connaissons finiront par disparaître dans le néant. Petite revue des scénarios possibles pour le très lointain futur.

L'énergie dont dispose une étoile au cours de son existence est proportionnelle à sa masse. Mais l'intensité des réactions nucléaires au sein d'une étoile augmente, elle, très rapidement avec sa masse, ce qui diminue d'autant sa durée de vie. Au final, ce sont les petites étoiles qui brillent le plus longtemps : bien qu'ayant moins d'énergie à leur disposition, elles en usent avec bien plus de parcimonie.

Les étoiles avant les planètes

L'espérance de vie des étoiles plus petites que le Soleil varie à peu près comme l'inverse du cube de leur masse : une étoile dix fois moins massive que le Soleil vivra environ 1 000 fois plus longtemps, soit 10 000 milliards d'années. Les plus petites étoiles possibles ayant une masse minimale d'environ sept pour cent de celle du Soleil (en deçà, les réactions de fusion ne perdurent pas), les dernières étoiles parmi celles qui brillent déjà aujourd'hui s'éteindront dans 10^{14} ans environ en se transformant en naines blanches, qui se refroidiront lentement.

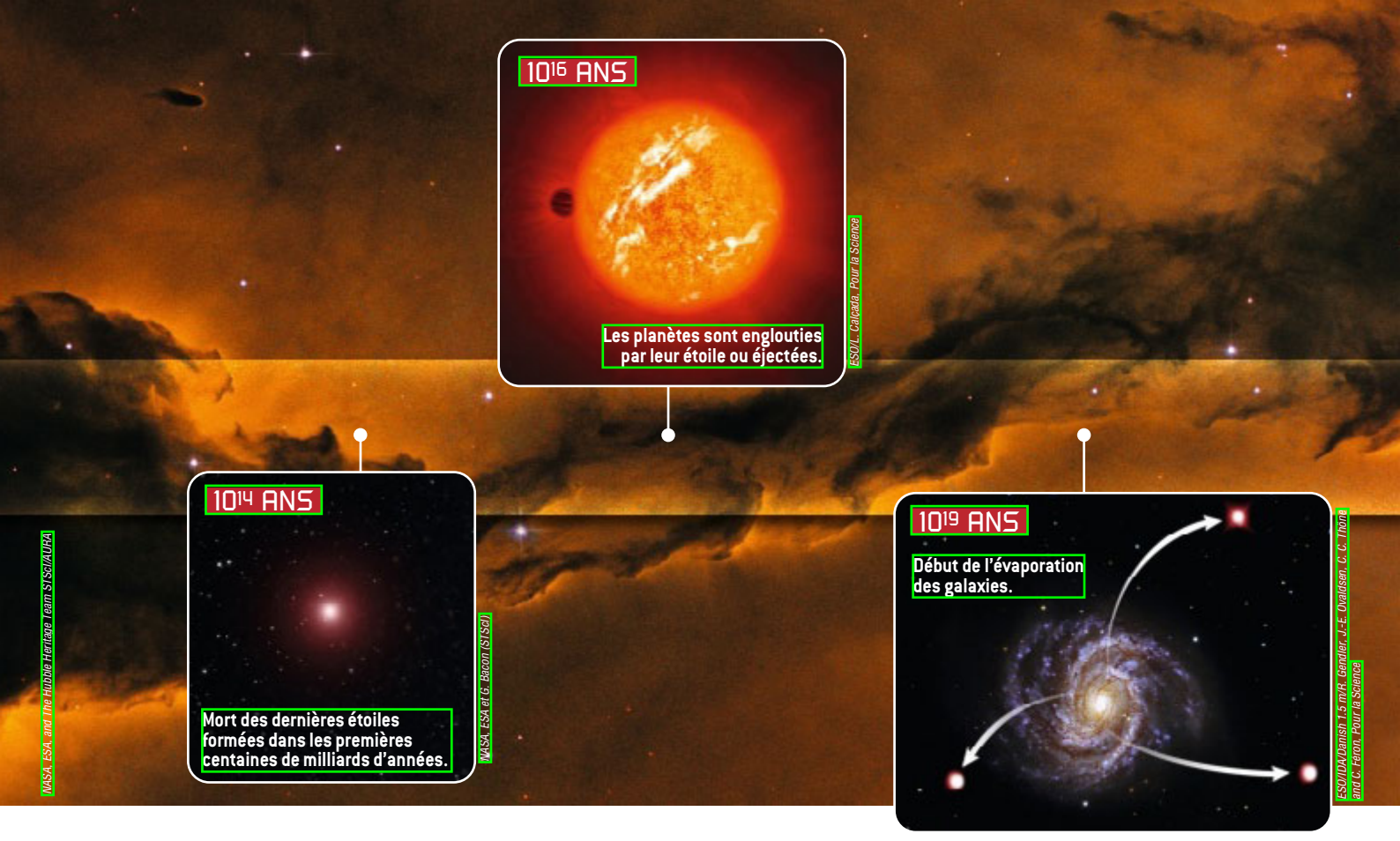
Dans l'intervalle – ou plus tard –, la plupart des étoiles auront perdu leur cortège planétaire. Les étoiles passent la majeure partie de leur existence à transformer de l'hydrogène en hélium. Les étoiles de plus d'un dixième de masse solaire entrent ensuite dans une seconde phase, où elles brûlent l'hélium pour le transformer en carbone. Durant ce stade, dit de géante rouge, leur taille augmente de façon considérable. Les planètes les plus proches de ces étoiles se feront ainsi engloutir lors de la phase de géante rouge. C'est ce qu'il adviendra de Mercure et Vénus, et peut-être de la Terre.

Les planètes plus distantes, ou celles en orbite autour d'étoiles de plus faible masse, ne connaîtront pas un sort plus enviable. Une planète éloignée est moins liée à son étoile, et donc plus susceptible d'être arrachée lors du passage proche d'un autre astre. À l'inverse, le sort d'une planète assez proche de son étoile (moins d'un cinquième de la distance de la Terre au Soleil, ou unité astronomique) sera scellé par la gravitation elle-même. La théorie de la relativité générale prédit en effet que deux corps en orbite l'un autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles, sorte d'infimes vaguelettes de l'espace-temps, qui dissipent l'énergie du système. Cette émission d'ondes gravitationnelles provoque « l'usure » de l'orbite des deux corps, qui se rapprochent lentement, mais sûrement, et finissent par entrer en collision. Tel est le destin des planètes trop proches de leur étoile. Les calculs indiquent que dans 10^{16} ans tout au plus, c'en sera fini, d'une façon ou d'une autre, de tous les systèmes planétaires.

Existera-t-il d'autres générations d'étoiles après la fin de celles qui brillent aujourd'hui ? Probablement pas, car le taux de formation d'étoiles d'une galaxie

L'UNIVERS, AUJOURD'HUI PEUPLÉ d'innombrables galaxies comportant chacunes des centaines de milliards d'étoiles *(à gauche)*, finira peut-être totalement sombre et vide de toute matière *(à droite)*.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



diminue de façon drastique au cours du temps. Alors que l'équivalent de 100 masses solaires par an se formaient dans notre Galaxie à ses débuts, elle ne produit désormais guère plus qu'une masse solaire par an, chiffre qui n'a guère de chances d'augmenter, sauf à l'occasion de collisions ponctuelles avec d'autres galaxies. Passés 10^{14} ans et la mort des dernières étoiles actuelles, il n'y aura donc quasiment plus de nouvelles étoiles. Tout au plus des couples de naines brunes (des étoiles avortées du fait de leur trop faible masse) pourront-ils fusionner de temps en temps en raison de l'usure de leur orbite par émission d'ondes gravitationnelles. Des naines brunes de 0,05 masse solaire chacune et initialement séparées de dix unités astronomiques mettront ainsi entre 10^{18} et 10^{19} ans à se rapprocher en spirale avant de fusionner et former une nouvelle étoile.

Les galaxies se dispersent

Une autre possibilité est que des naines brunes solitaires errant au hasard se rencontrent. Mais même si les naines brunes sont très nombreuses dans une galaxie (probablement plusieurs centaines de milliards), ces collisions resteront très rares. Dans des temps lointains, il n'y aura ainsi guère plus que quelques centaines d'étoiles simultanément actives par galaxie, soit un milliard de fois moins qu'aujourd'hui. Mais cette phase durera longtemps : il faudra sans doute attendre 10^{22} ans pour que les collisions achèvent de transformer les dernières naines brunes en étoiles – lesquelles mourront à leur tour –, à supposer que les galaxies existent encore…

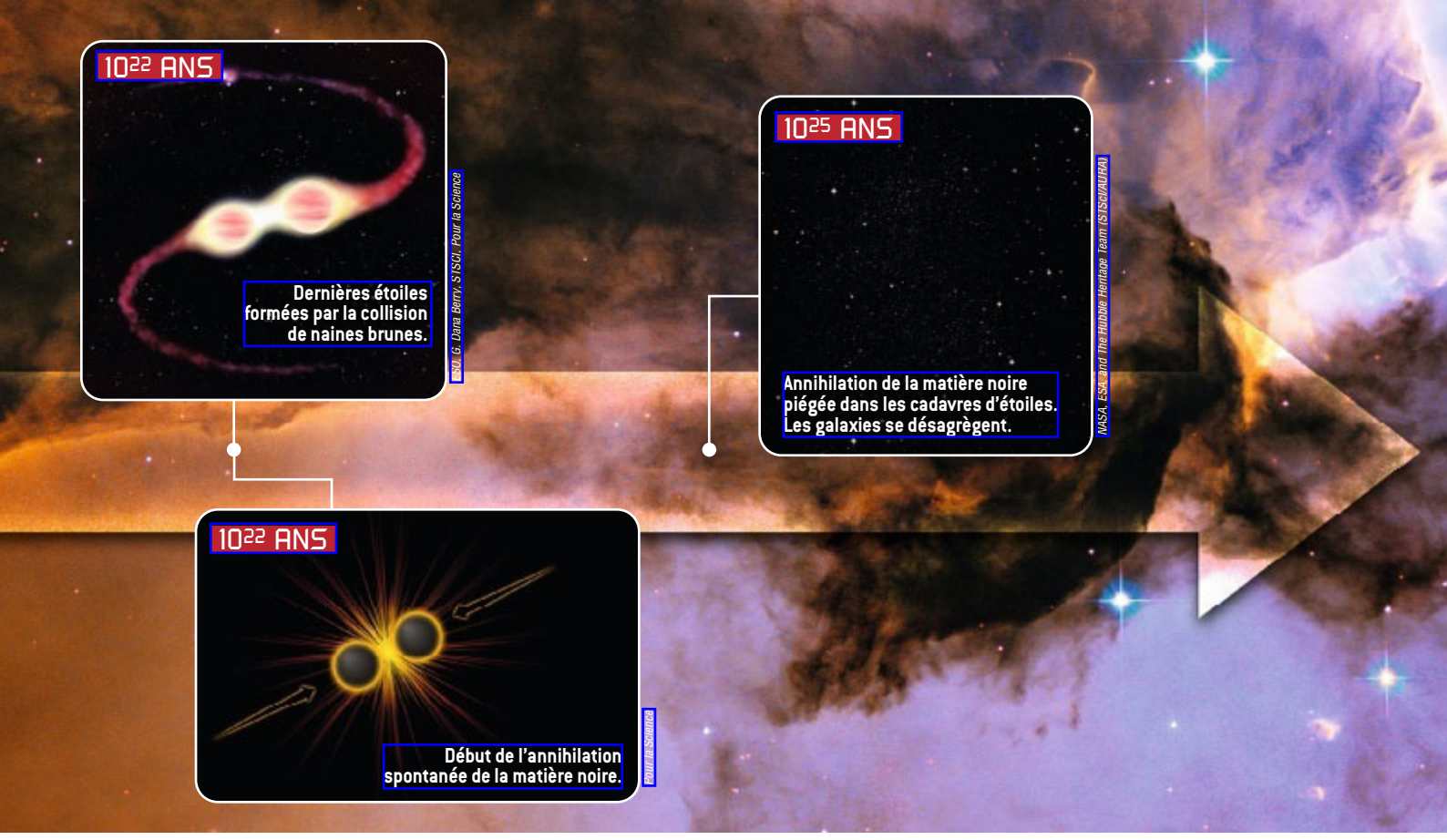
Car les galaxies non plus ne sont pas éternelles. Dans un premier temps, les galaxies proches fusionneront. C'est le destin qui attend la Voie lactée et sa voisine, la galaxie d'Andromède, dans quelques milliards ou dizaines de milliards d'années. Mais sur le long terme, les galaxies s'évaporeront.

Que les galaxies soient alors composées d'étoiles ou de résidus de l'évolution stellaire, les orbites de ces objets seront susceptibles d'être perturbées au gré de leurs rencontres rapprochées les uns avec les autres. Ces rencontres permettront à certains de ces astres d'acquérir assez d'énergie pour s'échapper de leur galaxie hôte. Ainsi, au final, la majeure partie des objets constituant les galaxies s'en échappera, tandis que la petite part restante (moins de dix pour cent) formera un système bien plus compact, qui fusionnera à terme avec le trou noir supermassif probablement tapi au centre de chaque galaxie. Le temps caractéristique de ce processus est d'environ 10^{19} ans pour une galaxie comme la nôtre.

Toutefois, les galaxies obtiendront peut-être un sursis. En effet, tout porte à croire que l'essentiel de la masse d'une galaxie n'est pas constitué de matière ordinaire, mais de matière noire, mystérieuse forme de matière composée de particules n'ayant encore jamais été observées en laboratoire et qui se manifestent uniquement par leurs effets gravitationnels. La matière noire contribue à retenir les étoiles et autres objets au sein des galaxies, ralentissant d'autant l'évaporation de celles-ci. Selon les modèles les plus populaires, la matière noire est composée de particules stables, mais qui peuvent s'annihiler deux à deux. Ces annihilations sont vraisemblement rares, du fait de la faible densité et de la faible capacité d'interaction de la matière noire. Néanmoins, le processus étant irréversible, et la matière noire étant confinée dans les structures qu'elle façonne, l'annihilation des particules finira par se produire tôt ou tard, laissant alors libre cours à la dislocation des galaxies.

Là encore, ce sera très long : même si la durée exacte est aujourd'hui impossible à déterminer, on peut estimer qu'il faudra au moins 10^{22} ans pour que la matière noire s'annihile, permettant alors l'évaporation complète de la galaxie si cela n'est pas déjà fait. Mais même dans le cas où ce serait bien plus long, une autre voie de disparition de la matière noire existe : en voyageant dans

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



leur galaxie mourante, les éventuelles naines blanches et naines brunes captureront sur leur passage une infime partie de la matière noire. Peu à peu concentrée dans le cœur de ces cadavres stellaires, elle s'annihilera d'autant plus rapidement… mais il faut compter 10^{25} ans tout de même pour qu'elle disparaisse par ce biais (et que, par suite, les galaxies disparaissent aussi).

La vie telle que nous la connaissons demeure *a priori* possible tant que brillent des étoiles, c'est-à-dire pendant les 10^{14} ans de l'ère stellaire. Peut-elle se prolonger au-delà ? Il est difficile d'imaginer une source d'énergie pérenne et stable autre que les étoiles qui autorise un développement naturel de la vie. Mais peut-être une civilisation très avancée sera-t-elle en mesure de survivre à la mort de son étoile. Car même mort, un résidu stellaire peut produire une quantité considérable d'énergie.

Tel est le cas des trous noirs. Un faisceau d'observations suggère en effet que les trous noirs sont en rotation très rapide, et qu'une partie de leur énergie totale provient en fait de leur énergie cinétique de rotation. Or Roger Penrose a montré dans les années 1960 qu'il est théoriquement possible d'extraire l'énergie de rotation d'un trou noir, en s'approchant et en y « jetant » de la masse. Finalement, ce sont 42 pour cent de l'énergie de masse d'un trou noir qu'il serait potentiellement possible de récupérer. Même s'il s'agit d'un simple trou noir de masse stellaire, cela équivaut à la puissance solaire reçue par la Terre pendant 10^{23} ans ! Mais des structures biologiques peuvent-elles subsister sur de telles échelles de temps ?

Les atomes meurent aussi

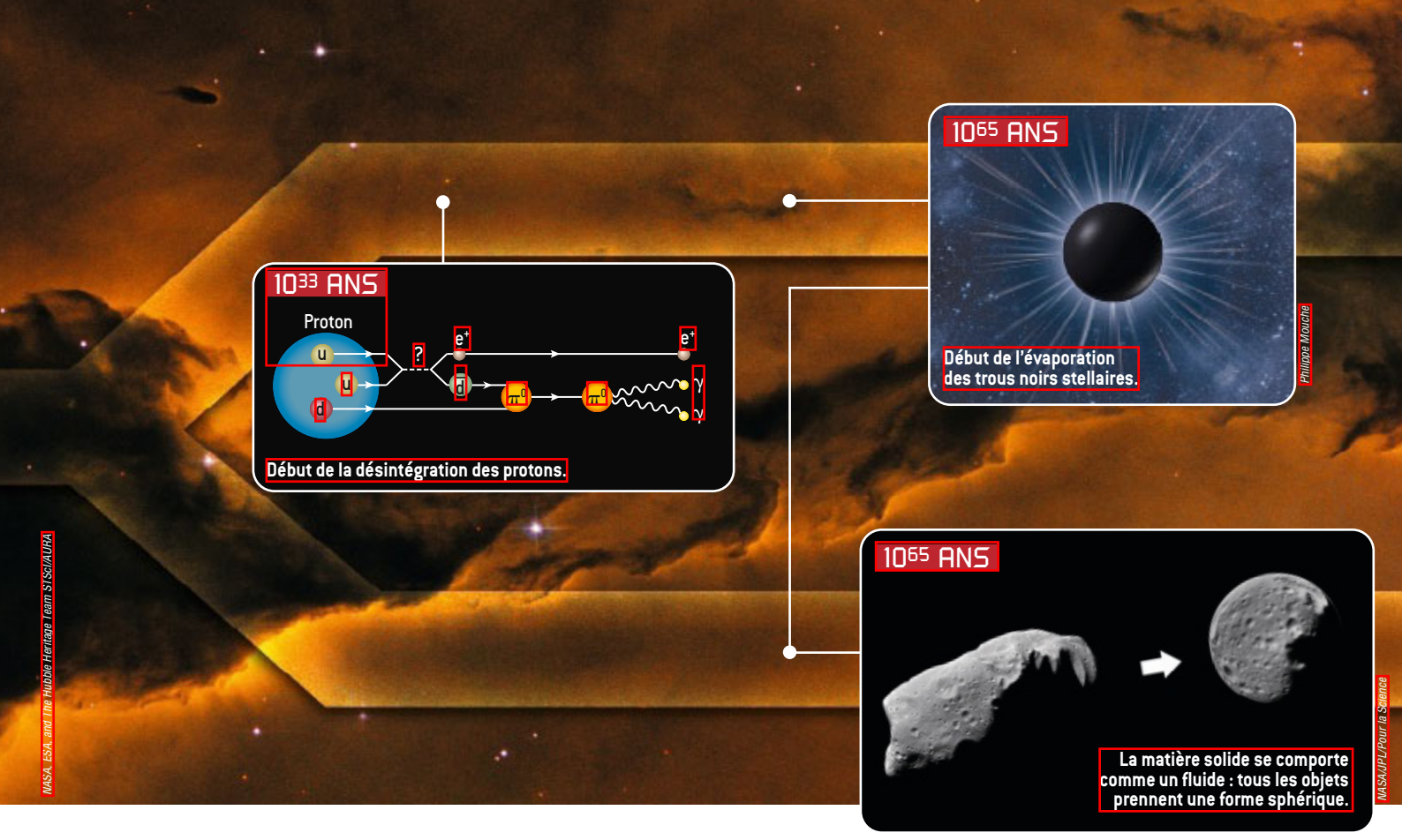
Sur le long terme, le devenir des résidus de l'évolution stellaire dépend de la stabilité de la matière. D'après le modèle standard de la physique des particules, l'électron et le proton sont parfaitement stables, et il existe au moins un élément, le fer 52, qui est parfaitement stable. La matière pourrait donc être, dans certains états, d'une absolue stabilité. Mais il semble établi aujourd'hui que le modèle standard n'est qu'une théorie valable à basse énergie, et qu'elle découle d'une théorie plus générale, encore à construire.

Ces théories dites de grande unification prédisent que le proton n'est pas stable et, par conséquent, qu'aucun atome ne l'est. Dans ce cadre, contrairement au modèle standard, les quarks, constituants du proton et du neutron, peuvent interagir pour former des leptons (particules non soumises à l'interaction forte). Le proton contient deux quarks *u*, de charge électrique 2/3, et un quark *d*, de charge électrique –1/3. Une voie

L'AUTEUR

Alain RIAZUELO
est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



Le temps (presque) absolu de la cosmologie

On a pour habitude de dire que l'Univers est âgé de 13,7 milliards d'années. Mais la théorie de la relativité nous a appris que le temps est différent pour chaque observateur et que parler de temps universel n'a pas de sens. Qu'en est-il alors de ce « temps cosmique » ?

L'Univers est, à grande échelle, homogène et isotrope. Cela signifie que tous les points sont équivalents, et en particulier que le temps s'y écoule partout de la même façon. De ce fait, d'hypothétiques horloges mises en route peu après le Big Bang et emportées par la suite avec la matière dans l'expansion resteraient aujourd'hui encore synchronisées de façon remarquable (les écarts atteindraient quelques centaines de milliers d'années au plus). En d'autres termes, le temps cosmique est une extension de notre temps propre à l'échelle de l'Univers, autorisée par l'homogénéité de celui-ci dans nos modèles cosmologiques.

de désintégration possible est l'annihilation des deux quarks u en un positron (c'est-à-dire un anti-électron) et un antiquark $\bar{d}$. Cet antiquark s'associe au quark d restant pour former une particule nommée pion, qui se désintègre très vite en deux photons. Finalement, le proton se désintègre en quelques photons et un positron, lequel pourra s'annihiler avec un électron du voisinage.

Une autre voie de désintégration implique la production d'un antimuon (μ^-). La désintégration du proton n'a pour l'heure jamais été mise en évidence. Les estimations de la durée de vie du proton sont donc des limites inférieures, qui vont de 10^{29} à 10^{32} ans, selon le type de désintégration attendu.

Mais ces limites ne sont guère contraignantes, car la durée de vie du proton est probablement plus longue. Elle est en effet déterminée par la masse d'une particule intermédiaire aujourd'hui inconnue qui intervient dans ce type de désintégration, et la durée de vie est d'autant plus grande que cette particule est massive. La durée de vie du proton pourrait ainsi atteindre 10^{49} ans si ce médiateur est très massif. Un autre scénario faisant intervenir non plus une, mais trois particules médiatrices, suggère même une durée de vie de 10^{200} ans. Il semble cependant moins plausible.

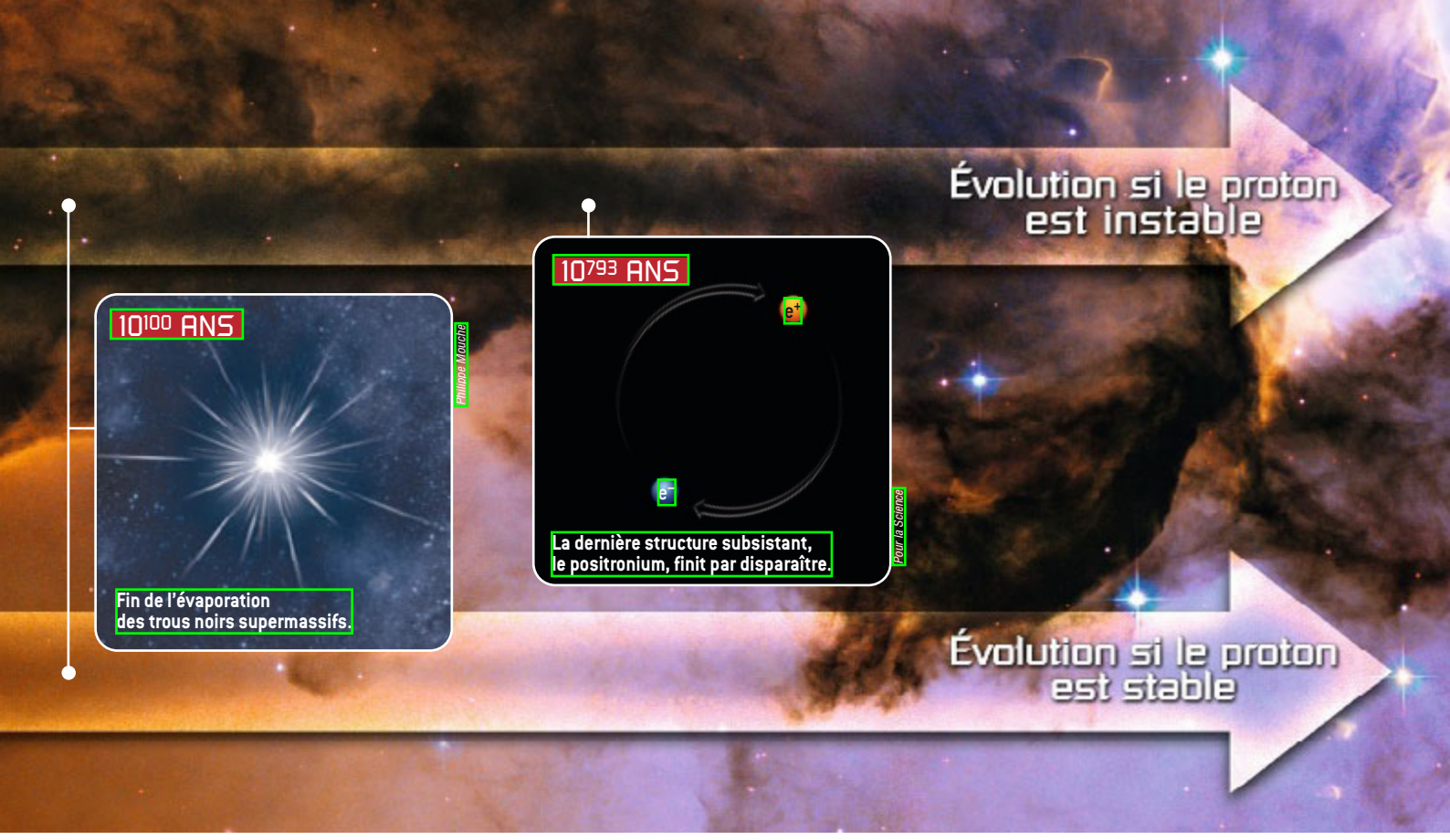
Quoi qu'il en soit, lorsque tous les protons se seront désintégrés, toute forme de matière ordinaire hormis les électrons, les positrons et les neutrinos aura disparu. Seuls subsisteront les trous noirs résultant de l'évolution des étoiles, ou leurs homologues supermassifs issus du centre des galaxies. Soulignons que les photons étant sans masse, leur fréquence est décalée vers le rouge par l'expansion et ils perdent donc de l'énergie ; ils représentent vite une énergie totalement négligeable comparée à celle du reste de la matière.

Les trous noirs s'évaporent

Du point de vue de la relativité générale, les trous noirs sont des objets d'une absolue stabilité. Mais Stephen Hawking a montré en 1974 qu'à cause des effets quantiques, les trous noirs émettent un très faible rayonnement – principalement des photons ou des neutrinos –, qui dissipe ainsi lentement, mais sûrement leur énergie. Cette évaporation des trous noirs est paradoxalement mieux établie, du point de vue théorique, que la durée de vie du proton. Le taux d'évaporation est d'autant plus élevé que la masse du trou noir est petite. Il faut ainsi 10^{65} ans pour qu'un trou noir d'une masse solaire s'évapore, et environ 10^{100} ans pour que les trous noirs supermassifs subissent le même sort.

Dans ce futur extraordinairement lointain, quand les trous noirs et la matière

© Pour la Science - n° 397- Novembre 2010



ordinaire auront fini par disparaître, il est possible que subsistent d'ultimes structures. En effet, il se pourrait que les électrons et positrons se combinent deux à deux pour former des positroniums, sorte d'atomes d'hydrogène où un positron remplace le proton. À notre échelle, le positronium a une courte durée de vie, mais si l'expansion de l'Univers ralentit son rythme, de telle façon que la densité d'électrons et de positrons ne diminue pas trop vite, des électrons et des positrons plus distants que le diamètre de l'Univers observable actuel pourraient se lier pour former du positronium d'autant plus stable que ses constituants sont distants. Selon la durée de vie du proton, ces positroniums perdureront 10^{141} à 10^{793} ans, et survivront donc à la fin des atomes et des trous noirs. Ce sera l'ultime structure résiduelle du cosmos. Mais les positrons et les électrons seront voués à lentement se rapprocher pour finalement s'annihiler en photons.

Les cailloux sont éternels

Tel est le scénario si le proton est instable à long terme. Mais que se passera-t-il si la matière ordinaire se révèle parfaitement stable ? Dans cette hypothèse, outre les résidus de l'évolution stellaire (naines blanches, naines brunes ou étoiles à neutrons), tous les objets de petite taille (poussières, astéroïdes, comètes...) seront alors plus stables que les trous noirs. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils cesseront d'évoluer. Au fil du temps, la matière ordinaire se refroidira quasiment jusqu'au zéro absolu. Mais même au zéro absolu, la matière n'est pas figée, car, en vertu des lois de la physique quantique, et notamment du principe d'incertitude d'Heisenberg, l'état d'énergie minimale d'un système n'a pas une énergie nulle.

Au gré des fluctuations quantiques, lentement mais sûrement, les atomes d'un objet résiduel se déplaceront les uns par rapport aux autres. Sur des échelles de temps suffisamment longues, un solide se comporte en fait comme un liquide très visqueux. Le temps caractéristique de ce processus dépend de façon exponentielle de la masse des atomes en jeu. Pour le fer, le plus lourd des éléments abondants, il atteint 10^{65} ans. À cette échelle de temps, tout objet, quelle que soit sa masse, se réorganisera lentement sous l'effet de sa propre gravité et acquerra, si ce n'est pas déjà le cas, une forme sphérique. Astéroïdes, comètes, rochers, poussières, tout finira par ressembler à une sphère.

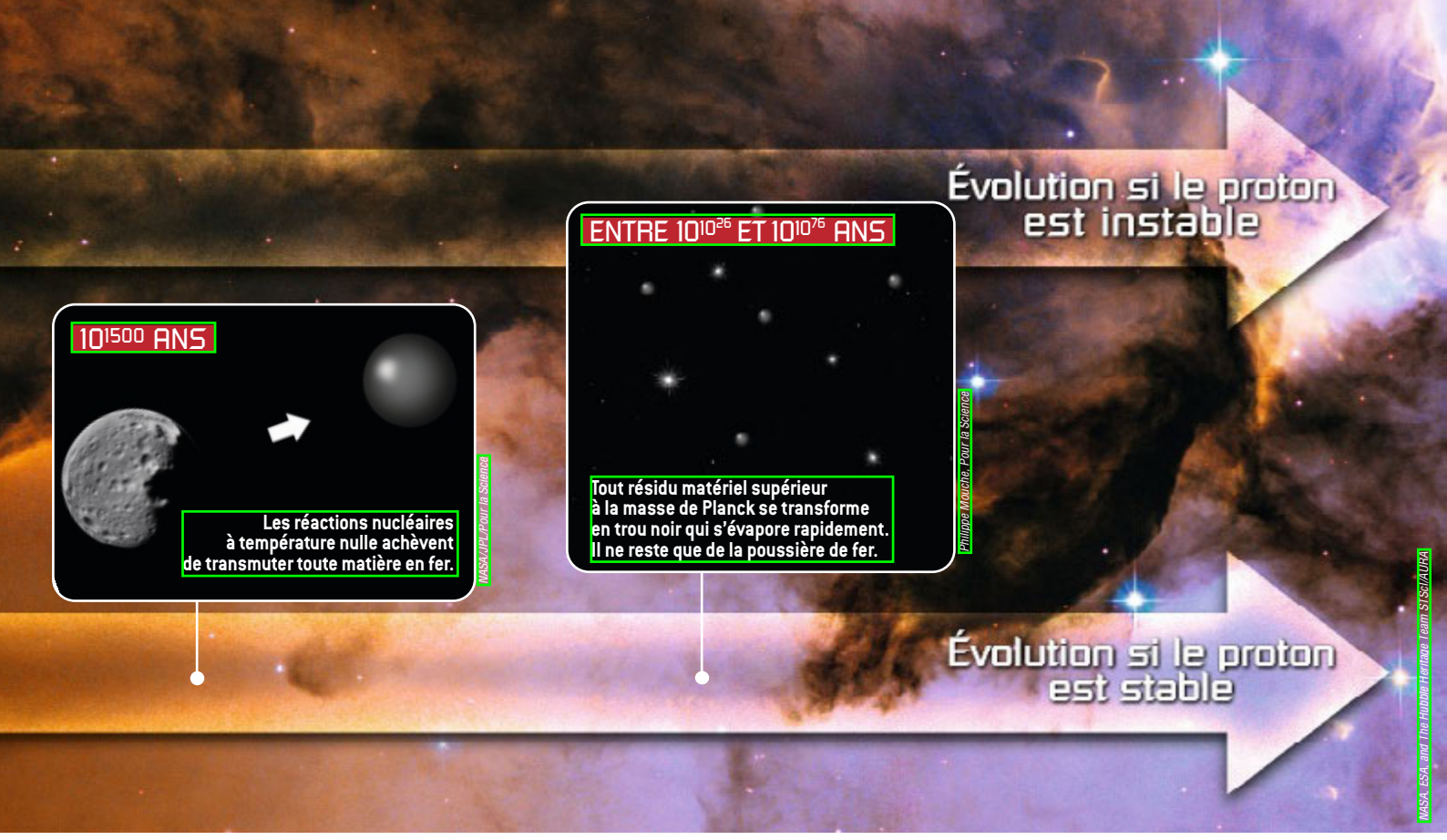
Mais les transformations à l'œuvre au sein de la matière ne seront pas achevées.

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES À TEMPÉRATURE NULLE transformeront toute matière en fer à l'échelle de $10^{1\,500}$ ans, bien plus que l'espérance de vie des plus gros trous noirs.

Car si deux atomes peuvent bouger même à température nulle, rien n'empêche également deux noyaux atomiques de se rapprocher, voire de vaincre leur répulsion électrostatique. Il suffit pour cela… d'attendre assez longtemps. Ainsi, à des échelles de temps colossales, la matière froide sera encore le théâtre de réactions nucléaires ! Le noyau atomique le plus stable étant le fer, ces réactions presque infiniment lentes de fusion ou de fission auront tendance à tout transmuter en fer. Ce sera réalisé en quelque $10^{1\,500}$ ans, bien plus que l'espérance de vie des plus gros trous noirs.

L'Univers sera alors un lieu immensément froid et vide où erreront des boules de fer de toutes tailles. Ce n'est toujours pas la fin de l'histoire. Un cristal d'atomes de fer n'est pas l'état de plus basse

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



énergie de la matière. Pour les objets assez massifs (au-delà de 0,3 masse solaire), notamment les naines blanches, devenues des naines noires de fer en refroidissant, il existe une configuration plus compacte et d'énergie plus basse : les étoiles à neutrons. Ces dernières sont des boules principalement composées de neutrons stabilisés par la gravité (s'il se désintégraient en électrons et protons, ceux-ci se recombineraient immédiatement, car plusieurs électrons, comprimés par la gravité, ne peuvent occuper le même état quantique).

Là encore, le principe d'incertitude n'interdit pas que les 10^{56} ou 10^{57} atomes d'une naine noire, en principe répartis dans un rayon de quelques milliers de kilomètres, se retrouvent à un moment donné confinés dans une boule d'une vingtaine de kilomètres de diamètre. La naine noire s'effondrera alors en étoile à neutrons, en dissipant son énergie en une ultime bouffée de rayons X et de neutrinos. Mais ces événements seront rarissimes : le temps caractéristique d'effondrement d'une naine noire en une étoile à neutrons est estimé à… $10^{10^{76}}$ ans, un nombre presque inimaginable, dont le nombre de chiffres dépasse le nombre d'atomes contenus dans plusieurs dizaines de millions de galaxies !

Suivant le même processus, mais plus rapidement, une étoile à neutrons résiduelle s'effondrera à son tour en partie en un trou noir, qui se chargera alors d'engloutir assez vite le reste de l'étoile. En fait, il ne sera sans doute pas nécessaire d'attendre que les naines noires s'effondrent en étoiles à neutrons, car une petite portion d'une naine noire peut s'effondrer directement en trou noir.

Vestige ultime : de la poussière de fer

La principale difficulté est de savoir quelle est la masse minimale du trou noir ainsi formé qui permette d'accréter le reste du cadavre stellaire. Les plus petits trous noirs, de la masse de Planck (20 microgrammes), se forment en $10^{10^{26}}$ ans, mais ils s'évaporent trop vite pour faire leur œuvre. La masse minimale d'un trou noir qui finit par engloutir l'objet qui lui a donné naissance est sans doute comprise entre quelques kilogrammes et quelques milliards de tonnes, ce qui demande d'attendre un temps compris entre $10^{10^{38}}$ et $10^{10^{56}}$ années pour les voir se former. Il semble qu'après cela, c'en sera définitivement fini de l'évolution de l'Univers. Subsisteront encore des agrégats de fer trop petits pour se transformer en trou noir. Virtuellement indestructibles, ce seront les ultimes vestiges du monde tel que nous le connaissons.

BIBLIOGRAPHIE

L. Krauss et R. Scherrer, **La fin de la cosmologie**, *Pour la Science*, n° 368, juin 2008. http://bit.ly/pls368-fin-cosmo

L. Krauss et R. Scherrer, **The return of a static universe and the end of cosmology**, *General Relativity and Gravitation*, vol. 39, pp. 1545-1550, 2007. http://fr.arxiv.org/abs/0704.0221

F. Adams et G. Laughlin, **A dying universe : The long term fate and evolution of astrophysical objects**, *Review of Modern Physics*, vol. 69, pp. 337-372, 1997. http://fr.arxiv.org/abs/astro-ph/9701131

D. A. Dicus *et al.*, **Effects of proton decay on the cosmological future**, *Astrophysical Journal*, vol. 252, pp. 1-9, 1982. http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1982ApJ...252....1D

F. Dyson, **Time without end : Physics and biology in an open universe**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 51, pp. 447-460, 1979. http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1979RvMP...51..447D

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

LA SÉLECTION DE POUR LA SCIENCE

Des livres à offrir ou à s'offrir

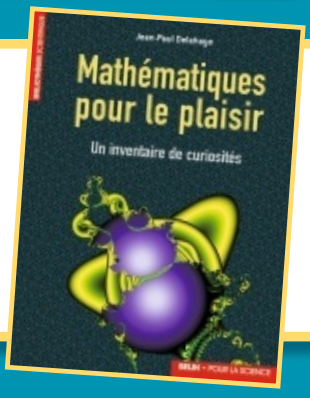
Nouveauté

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.

Dans ce livre, on découvre comment les mathématiciens de l'École de Moscou, inspirés par la secte hérétique orthodoxe de l'Adoration du Nom, finissent par croire à l'existence des infinis de la théorie des ensembles qu'avaient commencé à explorer des mathématiciens français.

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.

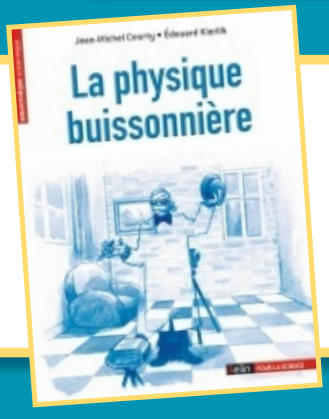
075107 • 288 pages • 24 euros



Les mathématiques sont faciles et s'y adonner est un plaisir. Les arts géométriques, les jeux de cartes, les jeux avec des dominos ou des damiers, la vie sociale et politique et ses subtiles stratégies, toutes ces activités sont mathématiques et souvent procurent des satisfactions… même à ceux qui clament ne pas aimer les mathématiques et y être « nuls ».

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique.

075104 • 208 pages • 25 euros



Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus.

Passionnés de physique et curieux de sciences, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé. Retrouvez les meilleures de leurs chroniques parues dans *Pour la Science*.

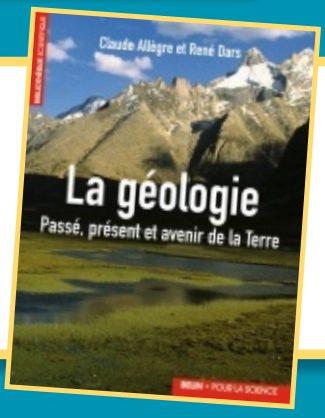
Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

075105 • 160 pages • 22 euros

Aujourd'hui, la géologie, c'est la théorie de la tectonique des plaques, mais c'est aussi l'histoire de la Terre, son économie, ses ressources (pétrole, minerais, eau), ses humeurs (catastrophes naturelles), etc. Le passé, le présent et l'avenir de la Terre ne peuvent être examinés que par la géologie.

Découvrez cet ouvrage très illustré rédigé par Claude Allègre, ancien directeur de l'Institut de physique du Globe, et son collègue et ami René Dars.

075102 • 304 pages • 35 euros



À DÉCOUVRIR ET À COMMANDER SUR WWW.POURLASCIENCE.FR

Emmanuel Douzery et Frédéric Delsuc

Les horloges de l'évolution

Le temps laisse aussi son empreinte dans les molécules du vivant. Les biologistes exploitent ce phénomène, nommé horloge moléculaire, pour remonter le cours de l'évolution des organismes.

L'ESSENTIEL

- **Des changements surviennent dans l'ADN et les protéines au cours du temps. Le rythme de leur apparition, relativement constant, constitue l'horloge moléculaire.**
- **Cette horloge permet de dater la divergence des groupes phylogénétiques.**
- **En « assouplissant » l'horloge, on tient mieux compte des variations du rythme d'évolution de l'ADN d'une espèce à une autre.**

© Shutterstock/stephan kerkhofs, aquatic creature, Fernando Cortes, Anyka, Hue Chee Kong, Pour la Science

Dinosaures, ptérosaures, ammonites, bélemnites… Ces animaux ont disparu de la surface du globe il y a plus de 65 millions d'années. Comment le savons-nous ? Par une méthode éprouvée : la datation par isotopes radioactifs des terrains les plus récents dans lesquels leurs fossiles ont été découverts. On dispose ainsi d'un registre paléontologique qui s'étend jusqu'aux premières cellules, datées de 3,5 milliards d'années.

Le problème, c'est que les archives paléontologiques sont forcément incomplètes. Nous ne sommes jamais sûrs d'avoir mis au jour le plus vieux représentant d'un groupe donné. L'âge le plus reculé d'un groupe d'organismes n'est donc jamais certain. En outre, certains fossiles sont difficilement identifiables, et l'on ne peut les rattacher avec certitude aux lignées des organismes vivants actuels. Par ailleurs, beaucoup d'organismes ne se sont tout simplement pas fossilisés, notamment parce qu'ils n'étaient constitués que de tissus mous.

Aujourd'hui, pour décrire l'histoire de la vie, les spécialistes de l'évolution font appel non seulement aux caractères morphologiques et anatomiques des organismes, mais aussi aux molécules, c'est-à-dire à l'ADN (du noyau cellulaire et des organites), aux ARN et aux protéines. L'étude de ces différents caractères permet de construire des arbres phylogénétiques.

Ces derniers sont constitués de branches, qui symbolisent l'évolution des lignées d'espèces, et de nœuds, qui désignent leurs ancêtres communs. Il en ressort deux types d'informations : les relations de parenté des organismes (deux lignées liées par un nœud sont étroitement apparentées), et leur « quantité d'évolution », représentée par la longueur des branches de l'arbre.

Sur ces arbres, nous pouvons remonter le temps et déterminer quand les groupes d'organismes ont divergé, en profitant d'un phénomène découvert dans les années 1960 : l'horloge moléculaire. Voyons comment elle fonctionne et comment on s'en sert.

Les nucléotides et les acides aminés, les constituants respectifs de l'ADN et des protéines, changent naturellement dans les cellules. Or, en 1962, le biologiste austro-américain Emile Zuckerkandl et le biochimiste américain Linus Pauling, de l'Institut de technologie de Californie, proposèrent que ces changements se produisent au cours du temps à un rythme constant quelle que soit l'espèce. Ils avaient constaté que la séquence (la suite des acides aminés) d'une protéine, la globine, présente chez l'homme 18 différences comparée à celle du cheval. Ils connaissaient par ailleurs, d'après les fossiles, à quelle époque la branche menant aux primates s'était séparée de celle des périssodactyles, le taxon du cheval. Ils concluèrent à l'existence d'une horloge moléculaire dont la valeur était égale à un certain nombre de changements d'acides aminés par million d'années ; ils définirent ainsi un taux d'évolution. Ce principe pouvait être généralisé à d'autres espèces *(voir l'encadré page 104)*.

Un chronomètre dans l'ADN

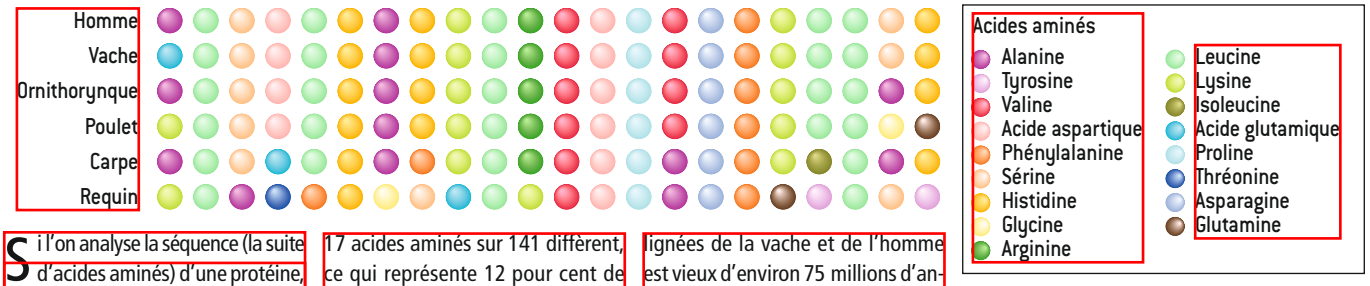
Admettons que les substitutions de nucléotides dans l'ADN, et d'acides aminés dans les protéines, apparaissent à un rythme constant, quelle que soit l'espèce : c'est l'hypothèse de l'horloge moléculaire globale, ou stricte, proposée par Zuckerkandl et Pauling. Il devient alors possible de déduire une date de séparation des lignées des deux espèces du nombre de changements moléculaires les distinguant – ou divergence moléculaire. Cela revient à estimer l'âge de leur dernier ancêtre commun. Dans certains cas, on retrouve la tranche d'âges établie à l'aide des fossiles. Dans d'autres, lorsque les archives fossiles sont restreintes ou absentes, on comble, en utilisant cette méthode, un vide dans l'histoire de l'évolution.

Par exemple, les plus proches parents des oiseaux, dans la nature actuelle, sont les crocodiliens. Or une protéine nommée alpha-globine diffère de 28 pour cent entre le poulet et l'alligator. Dans

1. L'HORLOGE MOLÉCULAIRE correspond au nombre de changements survenant dans une molécule au cours d'un temps donné. Associée à la description des relations de parenté entre organismes *(de haut en bas, un ver plat, une mouche, une grenouille et un singe)*, elle permet de dater le moment où ces lignées ont divergé.

LE PRINCIPE DE L'HORLOGE MOLÉCULAIRE

SÉQUENCE PARTIELLE DE L'ALPHA-GLOBINE



Si l'on analyse la séquence (la suite d'acides aminés) d'une protéine, quelle qu'elle soit, on constate qu'elle diffère d'une espèce à l'autre. Ainsi en est-il des protéines de la famille des globines, qui assurent le transport de l'oxygène chez les vertébrés. L'alpha-globine constitue l'une des quatre chaînes protéiques possibles (avec les chaînes bêta, gamma et delta) de la molécule d'hémoglobine, présente dans les globules rouges du sang. La comparaison de sa séquence chez l'homme et la vache montre que 17 acides aminés sur 141 diffèrent, ce qui représente 12 pour cent de divergence *(ci-dessus)*. Comparée à l'alpha-globine de l'ornithorynque, du poulet, de la carpe et du requin, celle de l'homme diverge de 27, 30, 50 et 56 pour cent, respectivement.

L'horloge moléculaire repose sur le nombre de changements d'acides aminés qui se produisent au cours du temps. Pour étalonner cette horloge, il faut faire appel au registre fossile des vertébrés. Par exemple, le dernier ancêtre commun connu des lignées de la vache et de l'homme est vieux d'environ 75 millions d'années ; celui des lignées du requin et de l'homme a environ 430 millions d'années. En plaçant les différents ancêtres communs sur une échelle de temps, on peut dater les nœuds d'un arbre phylogénétique décrivant les relations de parenté entre les six espèces *(ci-contre, a)*.

En représentant l'âge de l'ancêtre commun connu *(en abscisses)* en fonction du pourcentage de divergence de l'alpha-globine de l'homme vis-à-vis des cinq autres espèces *(ci-contre, b, en ordonnées)*, on constate que la divergence augmente avec le temps. La valeur de l'horloge, quant à elle, reste, en moyenne, constante durant 500 millions d'années *(droite verte)* : elle est ici de 0,125 pour cent par million d'années. Comme il s'agit d'une moyenne, il existe des écarts avec les âges de certains ancêtres communs estimés d'après les fossiles *(flèches rouges)*.

l'hypothèse de l'horloge globale, l'âge de la séparation des deux lignées, donc l'âge de leur dernier ancêtre commun, peut être calculé, sachant que 0,125 pour cent de changements surviennent par million d'années. Il serait ici de 28/0,125, soit 224 millions d'années. Les archives fossiles, quant à elles, font remonter les archosaures, les ancêtres des crocodiliens et des oiseaux, à environ 250 millions d'années.

Les soubresauts de l'horloge

En pratique, l'utilisation de l'horloge moléculaire se révèle compliquée. Il est d'abord difficile, contrairement aux apparences, de déterminer exactement le degré de divergence d'une séquence moléculaire entre deux espèces. En effet, dans la molécule d'ADN, un nucléotide remplace d'autant plus facilement un autre nucléotide qu'il appartient à la même famille chimique (les bases puriques ou les bases pyrimidiques). De même, dans une protéine, un acide aminé hydrophobe est remplacé plus souvent par un autre de même propriété chimique – une glycine par une valine, par exemple – que par un acide aminé hydrophile, telle une sérine. Il faut donc corriger les estimations de degré de divergence à l'aide de modèles de probabilité appropriés.

Deuxièmement, tous les changements de séquences ne sont pas détectés puisqu'un même site, dans une molécule, peut changer de multiples fois au cours de l'évolution, seul l'état final de la séquence étant observé. On risque donc de sous-estimer le taux de divergence moléculaire, et donc de faire passer une séparation de deux lignées pour plus récente qu'elle ne l'a été en réalité.

USGS

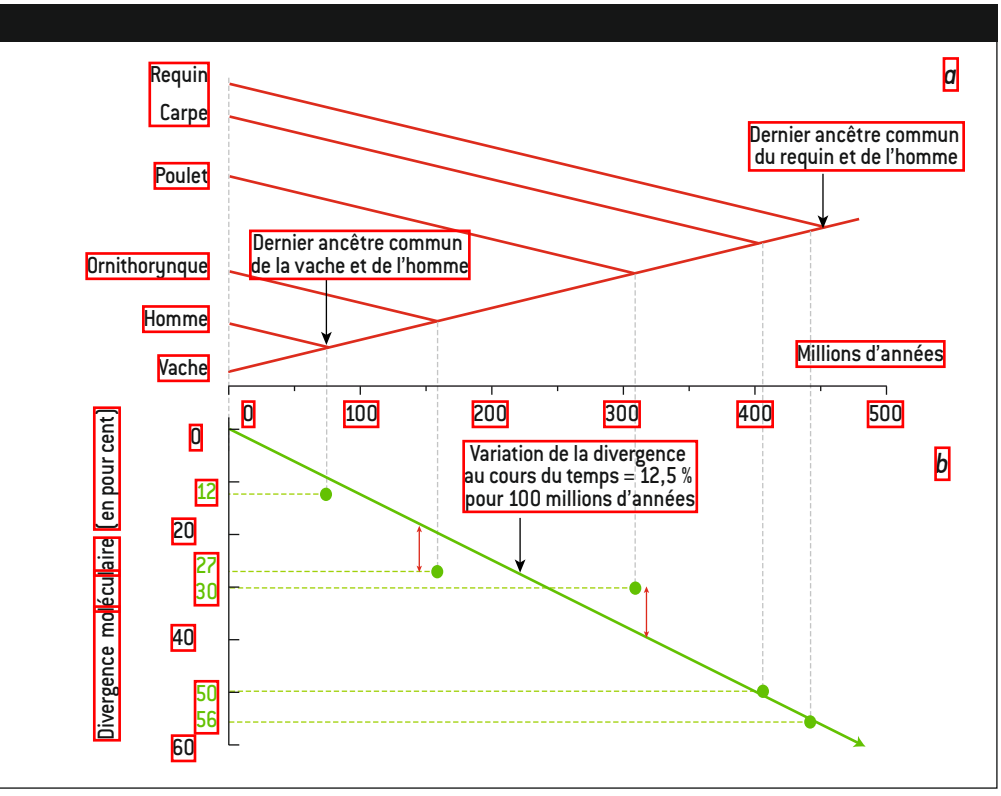
2. MEMBRE DU GROUPE DES TUNICIERS, cette ascidie *(Styela truncata)* fait partie, comme les vertébrés, de l'embranchement des chordés. Pourtant, le génome des tuniciers change plus rapidement que celui des vertébrés, ce qui disqualifie la notion d'horloge moléculaire à taux fixe.

Plus problématique, l'hypothèse de l'horloge moléculaire globale ne tient pas si on la confronte à la réalité. Ainsi, lorsque nous construisons les arbres phylogénétiques des rongeurs et des primates, nous constatons que, pendant un même laps de temps, les génomes du rat et de la souris ont plus changé que ceux de l'homme et du chimpanzé. De même, à une plus grande échelle taxonomique, l'ADN mitochondrial et nucléaire des tuniciers (violets, ciones, ascidies) change plus rapidement que celui de leurs plus proches parents, les vertébrés.

Ces disparités du rythme d'évolution des génomes ont des causes multiples. Citons, par exemple, la plus ou moins grande efficacité de la réparation de l'ADN (des espèces qui réparent mal leurs mutations évoluent plus vite), et la fréquence de la reproduction (des espèces qui se reproduisent plus fréquemment que d'autres sont sujettes à plus de mutations).

De surcroît, au sein d'une même espèce, différents gènes ou protéines peuvent évoluer à des vitesses différentes. En règle générale, plus une molécule est importante pour le fonctionnement de l'or-

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



LES AUTEURS

Emmanuel DOUZERY, enseignant-chercheur à l'Université de Montpellier 2, dirige l'Équipe de phylogénie moléculaire, où Frédéric DELSUC est chargé de recherche CNRS, à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (UMR 5554 CNRS).

SUR LE WEB

http://www.timetree.org/

ganisme, moins elle évolue vite. Par exemple, les histones, protéines liées à l'ADN, évoluent très lentement, tandis que les globines, protéines impliquées dans le transport de l'oxygène, et les fibrinopeptides, qui interviennent dans la coagulation sanguine, changent plus rapidement. Il n'existe donc pas une, mais des horloges moléculaires, selon la molécule étudiée… C'est un avantage : lorsque le taux d'évolution de la protéine est important, l'horloge représente un sablier utilisable pour étudier les courtes périodes ; lorsque le taux est faible, elle peut être l'équivalent d'horloges isotopiques pour les longues durées.

Assouplir l'horloge

Toutefois, dès que l'on veut comparer une même molécule dans différentes lignées, on est confronté à la disparité des vitesses d'évolution moléculaire selon les espèces. Depuis quelques années, les biologistes ont mis au point des méthodes qui prennent en compte ces variations : celle des horloges locales, et celle des horloges assouplies, ou relâchées.

La première méthode suppose que les changements moléculaires se produisent à taux constant sur certaines parties de l'arbre phylogénétique, celles reliant les groupes les plus proches – donc sur une période de temps donnée, de quelques millions d'années par exemple –, mais que leur rythme varie dans d'autres régions de l'arbre ou à de plus grandes échelles de temps. Il est cependant difficile de délimiter précisément les régions de l'arbre évoluant au même rythme, ainsi que le nombre de régions distinctes.

Les spécialistes préfèrent utiliser aujourd'hui une deuxième méthode, proposée en 1997 par Michael Sanderson, de l'Université de Californie à Davis, et développée depuis sous diverses formes. Elle présuppose que les vitesses d'évolution ne varient pas trop brusquement le long des branches d'un arbre phylogénétique. En effet, le taux d'évolution d'une branche de l'arbre phylogénétique est proche de celui de la branche dont elle descend.

Autrement dit, le taux de la branche parentale et celui des branches filles sont, en moyenne, identiques, comme dans le cas de l'horloge globale, mais avec des variations. Dès lors, le taux moyen peut prendre *a priori* une infinité de valeurs possibles. Heureusement, des méthodes mathématiques permettent de choisir des valeurs telles que la variation entre deux

Trois critères de fiabilité

Dater l'émergence des espèces à l'aide des horloges moléculaires requiert au moins trois conditions.

Premièrement, il faut incorporer à l'analyse suffisamment d'espèces. On détecte ainsi davantage de substitutions de nucléotides ou d'acides aminés, notamment les changements qui se sont produits à plusieurs reprises sur le même site moléculaire.

Deuxièmement, comme ce sont les fossiles qui nous fournissent les références de temps nécessaires, il est prudent d'utiliser plusieurs sources paléontologiques indépendantes de façon à disposer de plusieurs étalonnages des intervalles d'évolution.

Troisièmement, plusieurs gènes ou protéines indépendants doivent être inclus dans les analyses. Avec un large échantillonnage, les datations moléculaires dépendent moins des particularités évolutives d'un gène ou d'une protéine.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

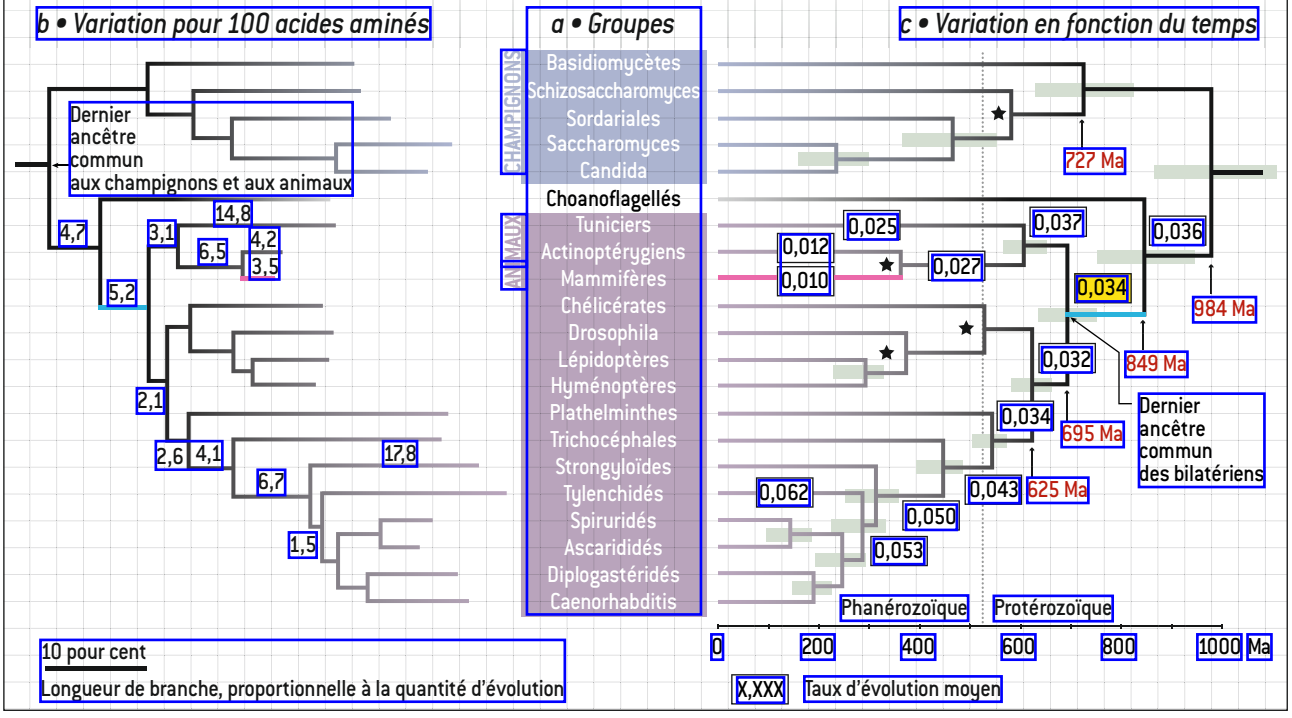
L'HORLOGE ET LA SÉPARATION DES ANIMAUX ET DES CHAMPIGNONS

Pour déterminer l'âge du dernier ancêtre commun des animaux et des champignons, on a comparé 30 399 sites d'acides aminés de 129 protéines chez 21 eucaryotes *(a)* : 15 animaux (dont un mammifère), cinq champignons et un choanoflagellé, unicellulaire à flagelle et collerette.

Cette comparaison permet de construire un arbre phylogénétique *(b)* représentant les relations de parenté entre groupes d'organismes et la « quantité d'évolution » de chaque branche. Cette quantité correspond au nombre de substitutions d'acides aminés qui se sont produites depuis la séparation avec la branche la plus proche. Ainsi, sachant que 1 064 différences d'acides aminés sur les 30 399 sites ont été trouvées dans la branche mammifères par rapport à toutes les autres, la quantité d'évolution de cette branche vaut 3,5 substitutions pour 100 sites d'acides aminés (1 064/30 399, *trait rose*).

On ignore jusque-là sur quel intervalle de temps s'est produite l'évolution de chaque branche. Pour le savoir, on tire parti de ce que la quantité d'évolution est équivalente au produit du taux de substitution d'acides aminés par la durée de la branche correspondante *(c)*. Grâce à la méthode de l'horloge assouplie, on fait une hypothèse sur le taux moyen d'évolution d'une branche. On peut alors déduire sa durée. Par exemple, la branche menant aux bilatériens *(trait bleu)* a une quantité d'évolution de 5,2 pour cent *(b)*. Tablant sur un taux moyen d'évolution de 0,034 substitution pour 100 sites et par million d'années *(en jaune)*, on calcule que la durée de cette branche est : 5,2/0,034, soit environ 154 millions d'années.

En construisant l'arbre, on trouve petit à petit l'âge de ses différents nœuds, avec une incertitude *(rectangles)* dont la grandeur dépend de l'hypothèse faite sur chaque taux d'évolution. Ainsi, en ajoutant les 154 millions d'années calculés précédemment à l'âge du nœud des bilatériens, il y a 695 millions d'années, on établit que la branche menant aux bilatériens a débuté il y a environ 849 millions d'années. La calibration de l'arbre à l'aide de fossiles d'âges connus *(c, étoiles)* permet d'orienter et de recaler cette remontée du temps.



branches consécutives soit la plus petite possible. Autrement dit, l'horloge moléculaire est assouplie pour admettre des variations de taux d'évolution, mais à partir de critères mathématiques qui attribuent des pénalités aux variations trop grandes.

Illustrons cette méthode en examinant la divergence des principaux rameaux d'animaux et de champignons *(voir l'encadré ci-dessus)*. D'après la découverte, en 2004, de fossiles dans la formation de Doushantuo, dans le Sud de la Chine, les animaux actuels à symétrie bilatérale (ayant des orientations avant-arrière, gauche-droite, et dorso-ventrale), ou bilatériens, sont apparus il y a 600 millions d'années. Un grand nombre de fossiles témoignent du fait que les bilatériens se sont diversifiés au début du Cambrien, il y a environ 540 millions d'années, un phénomène connu sous le nom d'explosion cambrienne.

Selon les datations moléculaires réalisées dans les années 1990 et 2000 à l'aide de diverses approches de l'horloge moléculaire, l'âge de l'ancêtre des bilatériens serait compris entre 573 et 1 200 millions d'années. Pour y voir plus clair, avec Hervé Philippe, de l'Université de Montréal, nous avons comparé les séquences de 129 protéines de 21 eucaryotes actuels.

Les bilatériens remis à l'heure

La reconstruction de l'arbre phylogénétique correspondant a confirmé que le taux d'évolution varie beaucoup selon les groupes *(ci-dessus, b)*. Ainsi, les protéines considérées changent deux à trois fois plus chez les vers nématodes (par exemple, les Tylenchidés) que chez les mammifères. Impossible donc de dater les

BIBLIOGRAPHIE

E.J.P. Douzery (sous la dir. de), **Phylogénie moléculaire**, dans *Biologie évolutive*, F. Thomas, T. Lefèvre et M. Raymond (sous la dir. de), De Boeck, 2010.

E.J.P. Douzery, F. Delsuc et H. Philippe, **Les datations à l'heure de la génomique**, *Médecine Sciences*, n° 4, vol. 22, pp. 374-380, 2006.

D. Bottjer, **À l'aube de la complexité animale**, *Pour la Science*, n °335, septembre 2005.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

âges de divergence des branches avec une horloge moléculaire globale. Nous avons donc eu recours à l'horloge moléculaire assouplie. En faisant une hypothèse sur le taux d'évolution des protéines le long de chacune des branches de l'arbre, on peut déduire de proche en proche l'âge des nœuds de l'arbre, avec toutefois une incertitude plus ou moins grande *(ci-contre, c)*.

Nous sommes arrivés à trois conclusions : la diversification des bilatériens date d'il y a 695 millions d'années (entre 642 et 761 millions) ; les animaux se sont séparés de leurs plus proches parents unicellulaires – les choanoflagellés – il y a 849 millions d'années (entre 761 et 957 millions) ; la séparation entre animaux et champignons est vieille de 984 millions d'années (873 à 1 127 millions). Les animaux bilatériens actuels se seraient donc diversifiés au moins 100 millions d'années avant l'explosion cambrienne.

Un tel décalage reflète sans doute la présence de lacunes dans le registre fossile, les premiers bilatériens ayant été probablement des animaux à corps mou qui n'ont pas été fossilisés. On voit là que la méthode moléculaire fournit des informations complémentaires de celles issues des données fossiles.

Les horloges assouplies peuvent être appliquées à de plus courtes échelles de temps. Ainsi, le registre fossile suggère que beaucoup de mammifères placentaires actuels sont apparus après la transition Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années. Or des études de datation moléculaire ont suggéré que l'origine des quatre rameaux majeurs de placentaires – auxquels appartiennent respectivement l'éléphant, le tatou, l'homme et le chien – remonte au Crétacé, il y a 100 millions d'années. La paléontologie et la biologie moléculaire doivent poursuivre leur dialogue afin de mieux cerner l'époque d'apparition du groupe auquel nous appartenons…

En parallèle, les chercheurs tentent d'améliorer encore les modèles d'horloges assouplies. Actuellement, par exemple, ces modèles ne décrivent que des changements graduels et se produisant sur de longues durées, ce qui permet de tabler sur des taux moyens couvrant plusieurs branches consécutives. Ils ne peuvent décrire les changements soudains ou épisodiques de taux d'évolution. Certains modèles issus de l'économie pourraient être adaptés à cette fin.

N'oublions pas enfin que les horloges moléculaires sont tributaires de calibrations paléontologiques fiables. Si un groupe d'organismes est dépourvu de fossiles, le taux d'évolution correspondant est extrapolé sur de plus grandes distances évolutives à partir de groupes d'organismes voisins pour lesquels on dispose de fossiles. On augmente alors l'incertitude sur le moment où cette lignée a divergé de la branche parente. En revanche, même si les âges fournis par les horloges moléculaires sont parfois empreints d'incertitude, ils aiguillent les recherches en indiquant des fourchettes temporelles dans lesquelles l'origine et la diversification des êtres vivants ont le plus de chance de se trouver.

Au rythme du jour et des saisons

P. Bourgin, É. Challet, M.-P. Felder-Schmittbuhl et V. Simonneaux

L'horloge centrale synchronisée par la lumière est localisée dans une petite aire cérébrale. De nombreuses horloges secondaires sont situées dans différents organes. Toutes ces horloges interagissent, garantissant des cycles d'éveil et de sommeil calés sur 24 heures.

L'ESSENTIEL

- L'horloge centrale est située dans le cerveau, précisément dans les noyaux suprachiasmatiques. Elle est contrôlée par la lumière du jour.
- La mélanopsine est un pigment de la rétine sensible à la lumière. Son activation déclenche une chaîne de signaux aboutissant à l'expression de « gènes d'horloge ».
- En plus de l'horloge centrale, il existe plusieurs horloges secondaires, par exemple celle qui commande la production d'insuline ; elles sont toutes synchronisées.
- La mélatonine joue un rôle essentiel dans la synchronisation de l'horloge circadienne, mais aussi dans la reproduction.

Bonjour. Pourquoi viens-tu d'éteindre ton réverbère ?
– C'est la consigne, répondit l'allumeur. Bonjour.
– Qu'est-ce que la consigne ?
– C'est d'éteindre mon réverbère. Bonsoir.
Et il le ralluma.
– Mais pourquoi viens-tu de le rallumer ?
– C'est la consigne, répondit l'allumeur.
– Je ne comprends pas, dit le petit prince.
– Il n'y a rien à comprendre, dit l'allumeur. La consigne c'est la consigne. Bonjour.

Antoine de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince*

L'horloge interne de l'allumeur de réverbère était sans doute bien perturbée ! Tous les organismes, de l'algue unicellulaire aux primates, sont soumis à des rythmes circadiens, dont la précision et la stabilité sont liées à l'existence d'une horloge interne. De nombreuses activités sont concernées : la prise alimentaire, la température corporelle, les sécrétions hormonales ou surtout l'alternance de la veille et du sommeil.

Ces rythmes physiologiques ont longtemps été considérés comme des réponses passives aux changements de l'environnement, en particulier au lever et au coucher du soleil. En 1729, le Français Jean-Jacques Dortous de Mairan est probablement le premier à avoir montré que cette rythmicité est endogène, en observant que les feuilles de *Mimosa pudica* s'ouvrent et se ferment selon un rythme d'environ 24 heures, même lorsque la plante pousse dans l'obscurité. En 1832, le naturaliste suisse Augustin Pyrame de Candolle montra que les rythmes des plantes maintenues en conditions constantes de lumière ou d'obscurité ne suivent pas ce rythme, suggérant que des éléments externes permettent de caler l'horloge sur des rythmes de 24 heures.

L'horloge centrale

En effet, ces rythmes biologiques dits circadiens (du latin *circa*, autour, et *dies*, jour) sont proches de 24 heures. Chez l'homme, le rythme veille-sommeil dans l'obscurité se maintient aux environs de 24 heures, mais se décale progressivement de jour en jour. Il existe donc des facteurs extérieurs, dont le principal est la lumière, qui synchronisent les rythmes biologiques pour les caler sur 24 heures. Ces synchronisations nous permettent d'être éveillés durant la journée et de dormir pendant la nuit.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Après avoir identifié les différentes horloges dont nous sommes dotés et qui sont toutes sous le contrôle d'une horloge centrale, nous examinerons comment elles se synchronisent. Nous verrons que la mélatonine est un puissant maître d'œuvre qui commande non seulement le rythme circadien (sur 24 heures), mais aussi les rythmes saisonniers auxquels nous sommes également soumis.

C'est dans les années 1960 que le neurobiologiste américain Curt Richter a montré que, chez les mammifères, l'horloge est localisée dans le cerveau ; ce fut une première étape dans la compréhension de sa localisation anatomique. Puis, au début des années 1970, on observa qu'une destruction des noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus, situés juste au-dessus de l'endroit où les nerfs optiques se croisent, perturbe, chez l'animal, les rythmes tant comportementaux (veille-sommeil) qu'hormonaux (la reproduction).

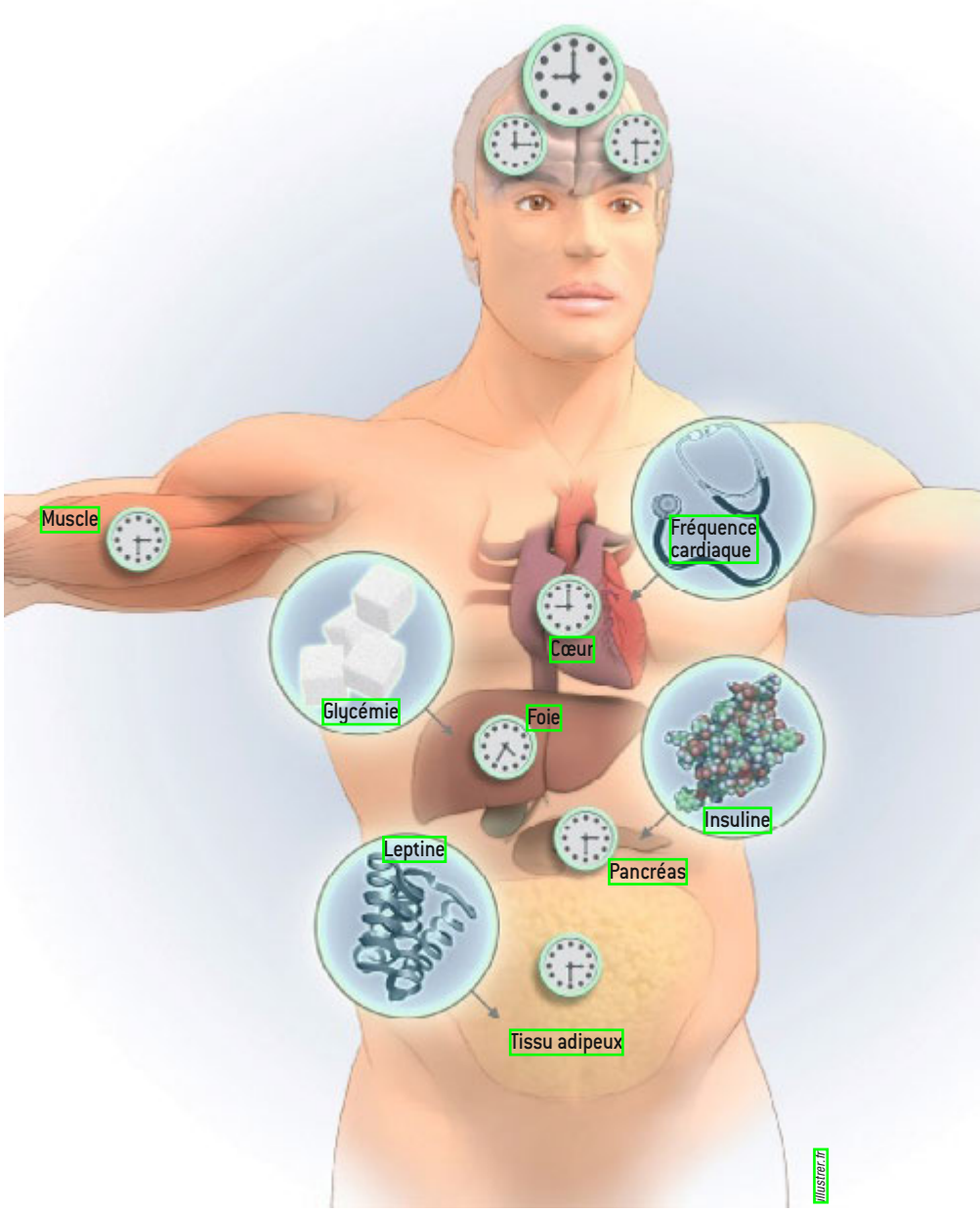
Des expériences réalisées sur des cellules isolées ont montré que chaque neurone de ces noyaux suprachiasmatiques est capable de produire et d'entretenir une oscillation rythmique circadienne. Depuis ces expériences, ces neurones sont considérés comme des pacemakers circadiens, et chacun d'eux est une cellule-horloge autonome. Récemment, les progrès de la biologie moléculaire et de la génétique ont permis d'identifier des gènes d'horloge et de montrer que tous les éléments nécessaires au fonctionnement d'une horloge biologique sont présents dans le plus petit rouage de ce système : chaque cellule contient tous les gènes d'horloge, mais leur expression varie selon les tissus.

Plusieurs horloges périphériques

L'expression de ces gènes et la synthèse des protéines qu'ils codent varient en fonction du temps selon une période de 24 heures : les protéines d'horloge présentent leur pic de concentration à des moments précis de la journée. Ces niveaux d'expression sont des indicateurs moléculaires du temps circadien. De surcroît, les protéines codées par ces gènes d'horloge sont des régulateurs de la transcription, c'est-à-dire qu'elles activent ou inhibent les gènes contrôlés par l'horloge (CCG pour *Clock Controlled Genes*). Cela signifie que de nombreuses boucles de rétroaction contrôlent l'expression des gènes d'horloge. Par ailleurs, l'analyse du transcriptome (l'ensemble des gènes transcrits en ARN messagers dans une cellule ou un tissu) durant 24 heures a montré que l'expression d'environ dix pour cent des gènes suit un rythme non seulement dans les cellules de l'horloge centrale (les noyaux suprachiasmatiques), mais aussi dans la plupart des organes périphériques analysés. Cela signifie qu'il existe une horloge centrale, mais aussi de nombreuses horloges dites secondaires.

Ainsi, la production et la libération de neurotransmetteurs dans le cerveau ou le métabolisme des sucres dans le foie et, plus généralement, toutes les fonctions de tous les organes sont coordonnées pour être synchronisées avec l'alternance cyclique du jour et de la nuit.

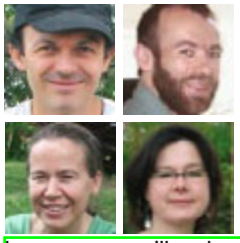
Au-delà de l'alternance de la veille et du sommeil, de nombreux paramètres physiologiques et comportementaux présentent une oscillation dont la période est



1. PLUSIEURS HORLOGES commandent les rythmes circadiens de l'organisme. Une horloge centrale située dans le cerveau synchronise toutes les horloges secondaires présentes dans le cerveau, le foie qui régule la glycémie, le pancréas qui libère l'insuline, le tissu adipeux qui synthétise la leptine, le cœur dont la fréquence change entre le jour et la nuit, ou encore les muscles.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

LES AUTEURS



Les auteurs travaillent dans le Département de neurobiologie des rythmes de l'Institut des Neurosciences cellulaires et intégratives du CNRS, UPR 3212, à Strasbourg.

Patrice BOURGIN est professeur de neurologie. Il est également responsable du Laboratoire du sommeil des Hôpitaux universitaires de Strasbourg.

Étienne CHALLET est directeur de recherche au CNRS.

Marie-Paule FELDER-SCHMITTBUHL est chargée de recherche.

Valerie SIMONNEAUX est directrice de recherche au CNRS et responsable du Département de neurobiologie des rythmes.

Site de l'Institut : inci.u-strasbg.fr/dept a/fr/dept a.html

égale à 24 heures. Il est essentiel que tous ces rythmes soient coordonnés. Par exemple, il faut que la mise en réserve de l'énergie absorbée avec la nourriture s'effectue pendant la période de veille, et que les réserves énergétiques puissent être consommées durant le sommeil.

On a longtemps cru que tous les rythmes biologiques et leur coordination temporelle étaient sous le contrôle de la seule horloge centrale chez les mammifères. Mais la découverte récente d'oscillations circadiennes dans la quasi-totalité des tissus a bouleversé cette conception. Ainsi, l'horloge principale suprachiasmatique se comporte comme un chef d'orchestre, donnant la mesure à de nombreuses entités oscillantes et assurant la coordination temporelle de toutes ces horloges secondaires. Schématiquement, l'horloge centrale est synchronisée par les signaux issus de l'environnement (la lumière notamment). Elle commande la synchronisation des horloges secondaires situées dans les tissus périphériques. Mais ces dernières envoient aussi des signaux en retour vers l'horloge centrale. De nombreux mécanismes de rétroaction font dialoguer l'horloge centrale avec les horloges tissulaires secondaires.

Où sont localisées ces horloges secondaires ? Dans le cerveau (ailleurs que dans les noyaux suprachiasmatiques), mais aussi dans la majorité des tissus périphériques, dont le foie, le tissu adipeux et le cœur *(voir la figure 1)*. Le foie est l'un des premiers tissus où l'on a mis en évidence des gènes d'horloge similaires à ceux identifiés dans les noyaux suprachiasmatiques. Cette horloge jouerait un rôle important dans la régulation quotidienne de la glycémie. Les souris transgéniques chez qui l'horloge hépatique n'est pas fonctionnelle présentent une dérégulation de la glycémie. Chez l'homme, on constate que la glycémie est maximale en fin de nuit : cette anticipation des besoins garantit à l'organisme la quantité de sucre nécessaire quand il passe du repos à l'activité.

Le pancréas et le tissu adipeux sont également le siège d'oscillations circadiennes. En effet, le pancréas commande la production d'insuline, l'hormone qui régule la concentration sanguine en sucre. L'horloge est réglée de façon telle que la libération d'insuline diminue durant la nuit. De même, la majorité des gènes d'horloge s'exprime dans le tissu adipeux : une horloge serait également présente dans ce tissu périphérique. La formation de graisse de réserve et le rythme de synthèse de la leptine, une hormone essentielle dans le contrôle de la satiété, sont commandés par l'horloge du tissu adipeux. Ainsi, chez le rongeur, la concentration de leptine est maximale durant la nuit, cet animal ayant essentiellement une activité nocturne.

On observe aussi des oscillations rythmiques des gènes circadiens dans le cœur et dans les muscles. Un cœur isolé *in vitro* présente des variations quotidiennes de fréquence cardiaque et d'expression des gènes impliqués dans le métabolisme. La fréquence cardiaque augmente durant la journée et ralentit durant la nuit, ce qui permet à l'organisme de passer de l'activité au repos. En cas d'hypertrophie cardiaque, l'amplitude du rythme d'expression de ces gènes diminue, ce qui suggère une détérioration de cette horloge périphérique. Les muscles se comportent de la même façon. Une horloge secondaire commande leur activité circadienne, avec

2. L'HORLOGE CENTRALE est synchronisée par la lumière et contrôle toutes les horloges secondaires. Ces dernières peuvent subir des influences extérieures directes, l'alimentation, par exemple. De nombreuses rétroactions relient les horloges secondaires à l'horloge principale.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

une augmentation de l'efficacité musculaire durant la journée et un ralentissement pendant le repos nocturne.

La synchronisation de toutes les horloges

Comment l'horloge centrale des noyaux suprachiasmatiques coordonne-t-elle toutes ces horloges périphériques ? De deux façons : d'une part, par l'intermédiaire de projections neuronales issues de ces noyaux et qui atteignent (par l'intermédiaire de plusieurs relais neuronaux) les tissus périphériques ; d'autre part, par le biais de molécules qui diffusent dans le liquide céphalo-rachidien et dans les vaisseaux sanguins cérébraux, puis qui agissent à distance sur les horloges périphériques (c'est, par exemple, le cas du *Transforming Growth Factor-alpha* ou de la prokinéticine 2, libérés par les cellules des noyaux suprachiasmatiques).

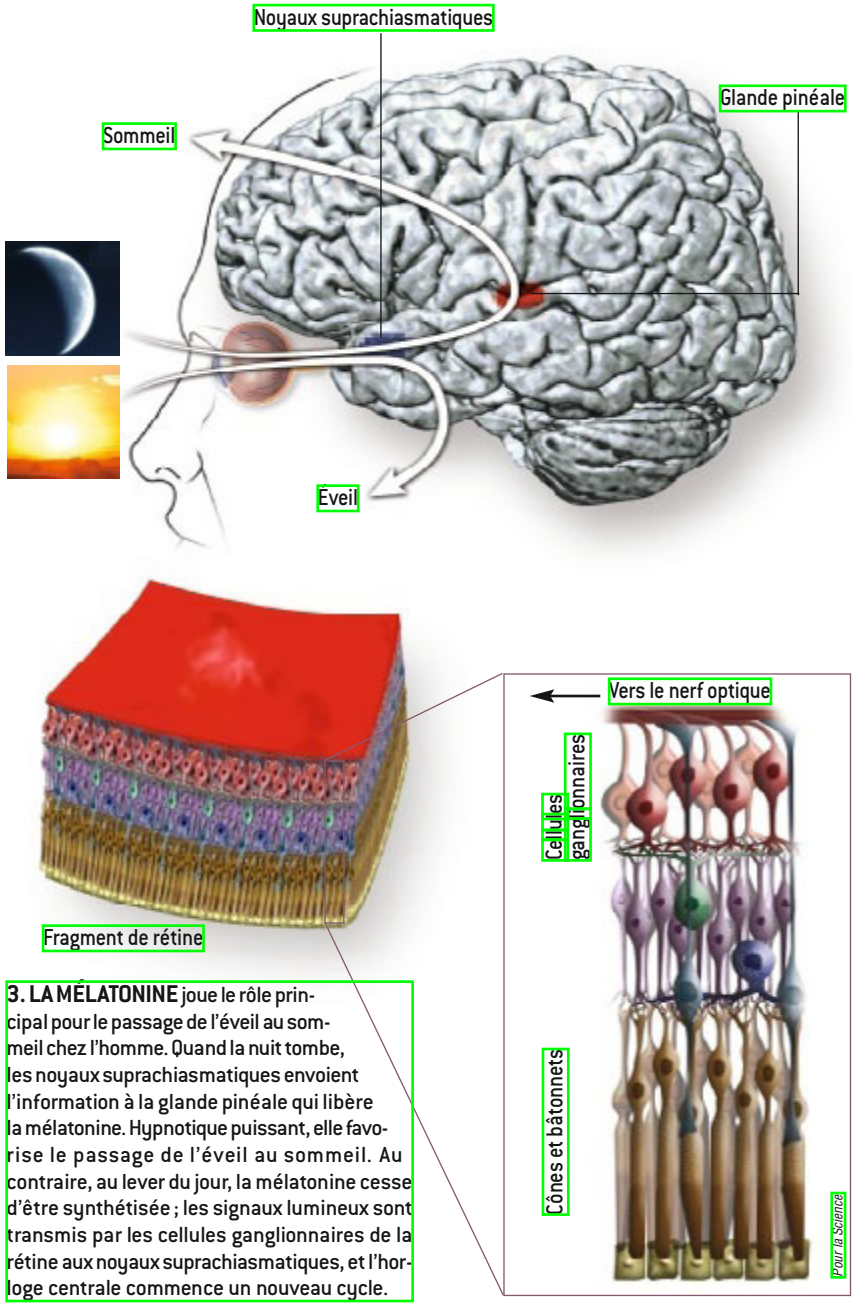
Les signaux de l'horloge suprachiasmatique sont transmis aux organes périphériques par l'intermédiaire du système nerveux autonome ou végétatif. C'est la partie du système nerveux qui agit de façon autonome, c'est-à-dire indépendamment de notre volonté. Il assure le fonctionnement du cœur, des muscles lisses ou encore des glandes endocrines (qui, par exemple, libèrent l'insuline).

Le système nerveux autonome est subdivisé en un système orthosympatique et un système parasympathique, lesquels ont des effets antagonistes sur les viscères : le système orthosympathique stimule ce que le système parasympathique inhibe. L'effet résultant dépend de la part relative des innervations orthosympathiques et parasympathiques sur l'organe concerné. Comment les neurones des noyaux suprachiasmatiques sont-ils connectés aux organes cibles ?

Les neurones dont le corps cellulaire est situé dans ces noyaux se projettent sur des zones relativement proches, surtout dans les noyaux paraventriculaires de l'hypothalamus. Les neurones de l'hypothalamus sont eux-mêmes connectés à des neurones du tronc cérébral, puis de la moelle épinière, lesquels se projettent vers les différents organes cibles de l'horloge circadienne (cœur, tissu adipeux, etc.).

Cette « circuiterie » relie physiquement les noyaux suprachiasmatiques et les organes pourvus d'une horloge secondaire. Des connexions – des synapses – relient tous les neurones de ce circuit. Quand les neurones des noyaux suprachiasmatiques reçoivent un signal lumineux (indiquant que le jour est levé), ils transmettent l'information circadienne au moyen de neuropeptides, telle la vasopressine, ou de neurotransmetteurs, tels que le GABA et le glutamate. Ce réseau neuronal recale les horloges secondaires sur l'horloge principale et assure une synchronisation interne de l'ensemble des tissus innervés.

Un autre mode de synchronisation met en jeu des hormones. Toutes les cellules portant des récepteurs des facteurs hormonaux présents dans l'organisme sont sensibles à l'information temporelle liée



3. LA MÉLATONINE joue le rôle principal pour le passage de l'éveil au sommeil chez l'homme. Quand la nuit tombe, les noyaux suprachiasmatiques envoient l'information à la glande pinéale qui libère la mélatonine. Hypnotique puissant, elle favorise le passage de l'éveil au sommeil. Au contraire, au lever du jour, la mélatonine cesse d'être synthétisée ; les signaux lumineux sont transmis par les cellules ganglionnaires de la rétine aux noyaux suprachiasmatiques, et l'horloge centrale commence un nouveau cycle.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

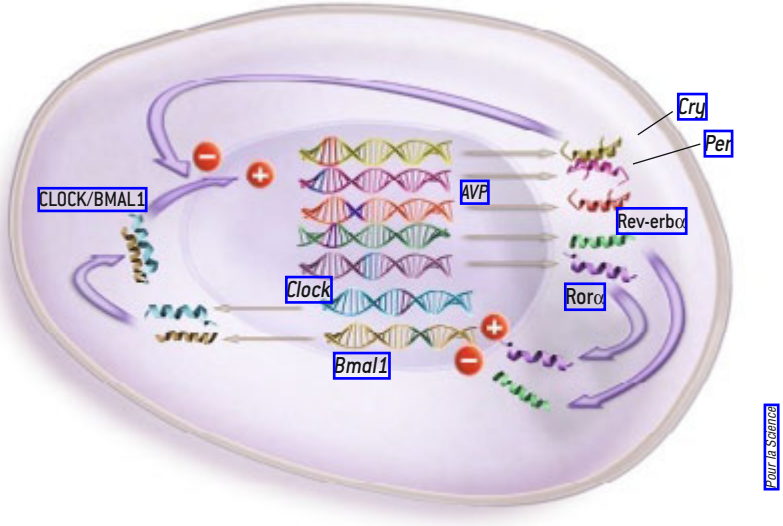
Les gènes de l'horloge circadienne

Chez les mammifères, toutes les cellules des horloges circadiennes, que ce soit l'horloge centrale ou les horloges secondaires, expriment des gènes d'horloge. Certains, tels *Clock*, *Bmal1*, *Period* (*Per1-2*) et *Cryptochrome* (*Cry1-2*), jouent un rôle prépondérant. Les gènes *Clock* et *Bmal1* produisent des protéines qui sont des facteurs de transcription. Lorsque les deux facteurs CLOCK et BMAL1 s'associent en un complexe, ils activent l'expression des gènes *Per* et *Cry* en se liant à une séquence spécifique de leur promoteur.

Les protéines PER et CRY s'accumulent à leur tour et interagissent pour réprimer le complexe CLOCK/BMAL1. De ce fait, la production de ces protéines ralentit à mesure qu'elles s'accumulent, et ce n'est qu'après un certain temps, quand l'ensemble des protéines PER et CRY ont été dégradées, que l'activation par CLOCK/BMAL1 peut recommencer. Ce cycle dure environ 24 heures, mais sa précision, son amplitude et sa robustesse sont contrôlées par de nombreux mécanismes moléculaires dits post-traductionnels, c'est-à-dire qui modifient les protéines. En raison de ces modifications, la capacité des facteurs d'horloge à être dégradés, à pénétrer dans le noyau ou encore à interagir avec leurs partenaires change.

Parmi les mécanismes modulateurs, il existe une autre boucle de rétrocontrôle, imbriquée avec la précédente et qui produit des oscillations de l'expression de *Bmal1*. Dans cette boucle, l'expression des facteurs de transcription ROR alpha (activateur) et REV-ERB alpha (répresseur) est aussi activée par le complexe CLOCK/BMAL1. En retour, ROR alpha et REV-ERB alpha activent et répriment alternativement l'expression de *Bmal1* en se liant à une séquence présente dans le promoteur du gène BMAL1.

Toutes ces interactions respectent une chronologie précise durant un cycle de 24 heures : les concentrations maximales des protéines PER et CRY, par exemple, sont décalées de 12 heures environ par rapport à celle de la protéine BMAL1.



BIBLIOGRAPHIE

Y. Dauvilliers et V. Cochen-De Cock, **Veille et sommeil, un équilibre dynamique**, *L'Essentiel Cerveau&Psycho*, n° 2, pp. 16-23, mai-juillet 2010.

J. Tsai *et al.*, **Melanopsin as a sleep modulator : circadian gating of the direct effects of light on sleep and altered sleep homeostasis in Opn4-/- mice**, *PLoS Biology*, 7(6), doi:10.1371/journal.pbio.1000125, 2009.

A. Klarsfeld, **Les horloges du vivant**, Éditions Odile Jacob, 2009.

E. Challet, **Entrainment of the suprachiasmatic clockwork in diurnal and nocturnal mammals**, *Endocrinology*, vol. 148, pp. 5648-5655, 2007.

F. Revel *et al.*, **Kisspeptin mediates the photoperiodic control of reproduction in hamsters**, *Curr. Biol.*, vol. 16(17), pp. 1730-1735, 2006.

à ces messages hormonaux. La synchronisation ne se fait plus directement par le biais d'un circuit, mais indirectement au moyen d'hormones qui diffusent dans tout l'organisme et agissent sur les organes dont les cellules portent des récepteurs de ces hormones. Les signaux circadiens émis par l'horloge suprachiasmatique sont d'abord véhiculés par le système nerveux autonome jusqu'aux glandes concernées, notamment la glande pinéale et les glandes surrénales, puis sont convertis en rythmes hormonaux qui permettent la synchronisation de toutes les horloges. Examinons comment.

Mélanopsine et information lumineuse

Commençons avec la lumière du Soleil, lorsque des rayons sont perçus par la rétine, ou plutôt, d'une part, par les deux grands types de photorécepteurs, les cônes et bâtonnets, les photorécepteurs « classiques » responsables du traitement de l'information visuelle, et, d'autre part, par une petite population de cellules ganglionnaires localisées dans la couche la plus interne de la rétine.

Ces cellules expriment un photopigment identifié il y a une dizaine d'années : la mélanopsine. Ce photopigment, particulièrement sensible à la lumière bleue, n'intervient pas dans le traitement de l'information visuelle (reconnaissance des objets, traitement des couleurs, etc.), rôle assuré par les cônes et les bâtonnets. En revanche, quand la mélanopsine est activée par la lumière, nous avons montré que les cellules ganglionnaires transmettent l'information lumineuse à certaines structures cérébrales avec lesquelles elles sont en connexion directe, dont les noyaux suprachiasmatiques. Ainsi, l'information lumineuse est transmise à l'horloge centrale par l'intermédiaire des cellules ganglionnaires à mélanopsine. Les cônes et bâtonnets peuvent également jouer un rôle, bien qu'à un moindre degré, en transférant l'information lumineuse aux cellules ganglionnaires à mélanopsine qui prennent ensuite le relais.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Sous l'effet d'une impulsion lumineuse, les cellules ganglionnaires libèrent deux types de molécules, un neurotransmetteur, le glutamate, et un neuropeptide, le PACAP. Ces signaux (*via* divers messagers intracellulaires) activent l'expression des gènes de l'horloge des neurones suprachiasmatiques, ce qui permet à l'horloge centrale de démarrer un nouveau cycle. La mélanopsine joue donc un rôle essentiel : elle cale le rythme veille-sommeil sur 24 heures en fonction de l'alternance de la lumière et de l'obscurité. Chaque jour, l'horloge est resynchronisée.

La mélatonine, pour le sommeil

La mélatonine est un important signal hormonal émis par l'horloge centrale et qui définit la « nuit biologique ». Elle est synthétisée dans la glande pinéale et libérée quand survient l'obscurité, sous le contrôle des noyaux suprachiasmatiques. La libération cyclique de la mélatonine impose un rythme circadien aux structures qui expriment des récepteurs de cette hormone. Les noyaux suprachiasmatiques exprimant eux-mêmes des récepteurs de la mélatonine, cela indique que l'hormone rétroagit sur l'horloge elle-même, de sorte que la mélatonine exogène (administrée à un sujet) peut agir sur le système circadien, ce qui a été confirmé expérimentalement : elle a un effet dit chronobiotique. Ainsi, la mélatonine synchronise l'horloge et, le soir, avec le coucher du soleil et l'obscurité, c'est elle qui joue le rôle principal pour le passage de l'éveil au sommeil, en exerçant un effet hypnotique puissant chez l'homme : c'est un somnifère naturel.

Sa synthèse est bloquée par la lumière et sa concentration est minimale pendant la journée. Elle cesse aussi d'être synthétisée dès que l'on éclaire brièvement une pièce dans laquelle une personne dort. Cette méthode simple et efficace qui permet de supprimer la production de mélatonine chez un sujet endormi est utilisée par les équipes qui étudient le sommeil et la chronobiologie pour évaluer la réactivité de l'horloge circadienne en présence de lumière.

Cette hormone a fait l'objet de nombreuses recherches et elle est utilisée pour lutter contre les décalages horaires, car elle resynchronise les rythmes circadiens sur la nouvelle heure locale. Elle est aussi utilisée pour traiter certains troubles du sommeil et des rythmes circadiens.

Ainsi, l'horloge centrale, mais aussi toutes les horloges secondaires sont synchronisées par la lumière du jour. En dehors de la lumière, la prise alimentaire joue un rôle sur l'horloge biologique. Dans certaines expériences visant à étudier cet effet, on modifie l'horaire des repas, en les imposant, par exemple, durant la période habituelle de repos. Chez l'animal, ce type de protocole a permis de mettre en évidence que l'heure des repas est un puissant synchroniseur des horloges périphériques dans le foie, le cœur, le pancréas ou le tissu adipeux.

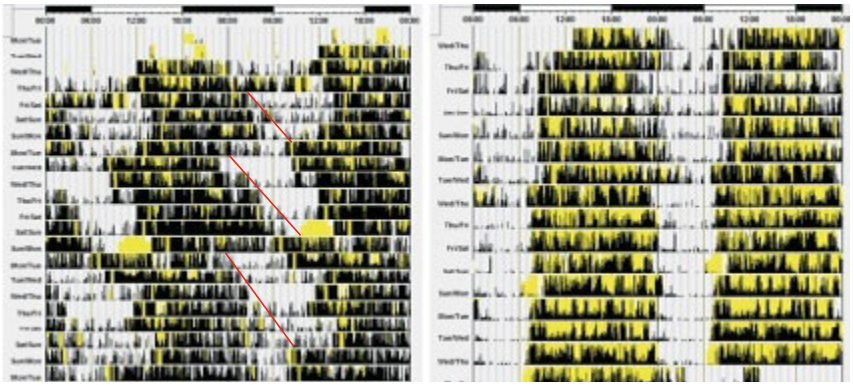
En revanche, l'horloge suprachiasmatique est relativement insensible à l'effet synchroniseur des repas. Cela signifie que l'horloge centrale est surtout synchronisée par la lumière, mais peu par l'alimentation, l'exercice physique ou encore les interactions sociales qui sont, avec la lumière, les principaux éléments agissant sur la synchronisation des horloges circadiennes. Au contraire, les horloges secondaires sont directement influencées par ces signaux extérieurs. En revanche, l'efficacité de ces signaux varie : la lumière synchronise fortement l'horloge centrale et les rétroactions avec les horloges secondaires sont importantes. Par ailleurs, l'alimentation, l'exercice physique ou les interactions sociales synchronisent les horloges secondaires, mais la modulation et les rétroactions sont faibles. Ainsi, la lumière et l'obscurité agissent directement sur les systèmes de régulation de l'horloge circadienne. Ce sont essentiellement elles qui déterminent la durée et la qualité de l'éveil et du sommeil, calant l'éveil sur le jour et le sommeil sur la nuit.

Ces rythmes, nous l'avons souligné, se calent sur 24 heures. Mais les organismes, notamment l'être humain, sont soumis à d'autres cycles, plus longs, calés sur les saisons. Voyons comment les horloges agissent sur ces cycles à plus long terme.

Le rythme des saisons

Durant l'année, les conditions de vie sont plus ou moins favorables en termes de température, de lumière, de nourriture disponible. La physiologie de la plupart des espèces est adaptée à ces contraintes environnementales. Certains animaux migrent, d'autres hibernent, pour d'autres encore l'activité métabolique change. L'activité de reproduction est généralement limitée au printemps, la période de l'année la plus favorable à la survie des petits. Ces phénomènes adaptatifs nécessitent que les organismes soient capables de détecter et de traduire les variations environnementales en informations nerveuses et moléculaires.

La durée d'éclairement quotidienne (la photopériode) change de façon régulière et reproductible au cours d'une année, et c'est le principal facteur environnemental utilisé pour synchroniser les fonctions biologiques avec les saisons. Ainsi une photopériode courte signale l'hiver et une photopériode longue correspond à l'été.



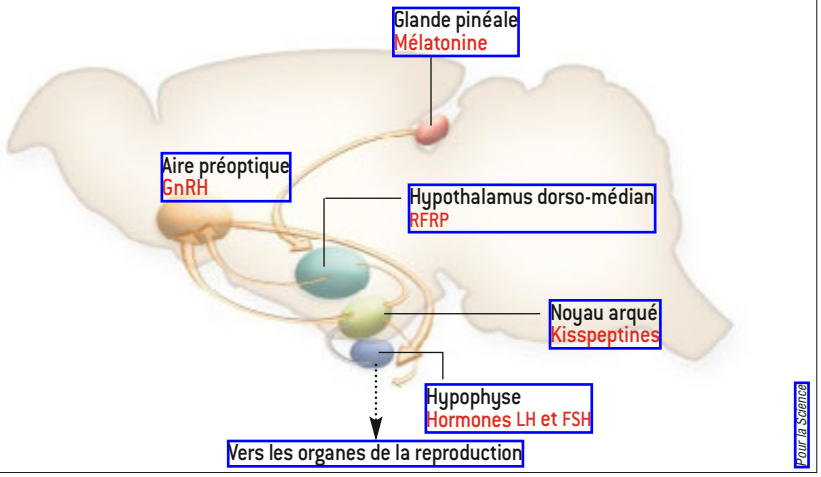
4. DES ACTOGRAMMES, enregistrements de l'activité locomotrice, sont réalisés à l'aide d'un actimètre, un petit boîtier porté au poignet, qui enregistre les mouvements ainsi que l'exposition à la lumière, durant plusieurs jours. Les données *(activité locomotrice en noir, exposition à la lumière en jaune)* sont représentées sur chaque ligne pour deux jours consécutifs, le deuxième jour est représenté à droite sur une ligne et à gauche sur la ligne suivante. On constate ici que le rythme circadien de la personne étudiée n'était pas entraîné par la lumière : on observe un décalage progressif *(traits rouges à gauche)* de l'heure d'endormissement (les zones grises correspondent aux périodes de sommeil). L'administration de mélatonine a permis de recaler le rythme circadien de cette personne qui dort désormais de 23 heures à 7 ou 8 heures environ *(à droite)*.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Mélatonine et reproduction

La mélatonine régule l'expression de plusieurs gènes, notamment de *Kiss1*, qui synthétisent les kisspeptines. Ce gène est exprimé dans les neurones de deux noyaux de l'hypothalamus : le noyau arqué et le noyau antéroventral périventriculaire. Les neurones à kisspeptines se projettent vers l'aire préoptique où sont localisés les neurones à GnRH et vers l'éminence médiane, qui contient les terminaisons de ces neurones. Les kisspeptines stimulent la libération de GnRH et la sécrétion des gonadotrophines LH et FSH, les hormones qui activent les gonades. Par ailleurs, les neurones qui expriment *Kiss1* sont soumis à des rétrocontrôles (négatifs ou positifs) des hormones sexuelles.

Or les structures hypothalamiques contenant les neurones à kisspeptines ne présentent pas de récepteurs de la mélatonine. Il est donc vraisemblable que cette hormone exerce son effet inhibiteur de façon indirecte, par le biais d'autres cellules. La mélatonine inhibe l'expression de *Kiss1*, mais aussi celle d'autres gènes, tels *Rfrp* et *Dio2*. Le gène *Rfrp* exprime les peptides RFRP dans des neurones de l'hypothalamus dorso-médian, où sont localisés des récepteurs de la mélatonine chez certaines espèces, en particulier le hamster syrien *(voir le schéma)*. La mélatonine agirait sur les neurones à RFRP qui réguleraient l'activité de reproduction soit en agissant directement sur les neurones à GnRH, soit par l'intermédiaire des neurones à kisspeptines du noyau arqué. De surcroît, des récepteurs de la mélatonine sont fortement exprimés dans les cellules à TSH de la *pars tuberalis*, et la mélatonine régule la production de cette hormone. Cette dernière régulerait la synthèse d'enzymes impliquées dans le métabolisme de l'hormone thyroïdienne localement, à la base de l'hypothalamus. Ce système complexe permettrait une régulation fine de la concentration locale de l'hormone thyroïdienne en fonction des saisons. L'administration de cette hormone est capable de réguler l'activité de reproduction de plusieurs espèces, mais on ignore encore par quel mécanisme. L'hormone thyroïdienne pourrait agir directement sur les neurones à kisspeptines puisque des récepteurs de cette hormone sont présents dans le noyau arqué, régulant ainsi la sécrétion de GnRH.



L'horloge des noyaux suprachiasmatiques est capable de détecter ces variations saisonnières de la lumière, qui sont alors traduites en rythmes de sécrétion de différentes hormones, en premier lieu la mélatonine. Cette hormone est, rappelons-le, synthétisée et sécrétée uniquement durant la nuit, d'autant plus longtemps que la nuit est longue. Ainsi, la quantité globale de mélatonine dans l'organisme varie selon les saisons.

Les neurones à kisspeptines

Récemment, des analyses génétiques ont permis d'isoler des gènes dont l'expression est régulée par la mélatonine. L'un d'entre eux, *Kiss1*, code une famille de peptides, les kisspeptines, qui se fixent sur un récepteur spécifique (Kiss1R). Une mutation du gène codant ce récepteur chez l'homme ou la souris bloque le développement pubertaire, révélant le rôle primordial des kisspeptines dans la régulation neuroendocrine de la reproduction.

Chez le hamster syrien, un modèle animal permettant d'étudier le rôle des saisons sur les fonctions biologiques, l'activité reproductrice est inhibée quand la photopériode est courte (conditions expérimentales reproduisant les conditions hivernales). Nous avons observé que, dans ces conditions, la synthèse des kisspeptines est réduite. Cette inhibition est due à l'augmentation de la production de mélatonine. Nous avons également montré que l'administration chronique de kisspeptines à des hamsters élevés en conditions de photopériode courte (inhibitrice) permet à l'activité de reproduction de reprendre. Ainsi, chez le hamster syrien, la mélatonine synchronise l'activité de reproduction avec les saisons en régulant l'expression des kisspeptines : en hiver, la nuit est longue, la production de mélatonine importante, ce qui inhibe la production de kisspeptines et, par conséquent, la synthèse des hormones de la reproduction.

Or, outre *Kiss1*, d'autres gènes sont inhibés par la mélatonine. C'est le cas du gène *Rfrp*, dont l'expression est fortement inhibée par cette hormone quand la photopériode est courte. Par ailleurs, des injections de RFRP perturbent la sécrétion des gonadotrophines et la production des hormones sexuelles. Ces données suggèrent que la mélatonine agit en premier lieu sur les neurones à RFRP qui pourraient réguler l'activité de reproduction par l'intermédiaire des neurones à kisspeptines ou en agissant directement sur les neurones à GnRH, une neurohormone qui contrôle la production des hormones sexuelles *(voir l'encadré ci-dessus)*. La découverte récente de plusieurs gènes s'exprimant dans l'hypothalamus et régulés par la mélatonine a permis de mieux comprendre les mécanismes cellulaires et moléculaires sous-tendant la reproduction.

On savait déjà que cette substance joue un rôle majeur dans la synchronisation de l'horloge circadienne. Cette double fonction fait de cette molécule un acteur clé de nos rythmes physiologiques. C'est d'ailleurs pourquoi elle représente aujourd'hui un enjeu clinique important : cette molécule ou d'autres qui renforceraient son action (des agonistes) ou l'inhiberaient (des antagonistes) pourraient être utilisées pour traiter les troubles du sommeil, qui touchent une proportion notable de la population. Par ailleurs, elle a déjà des applications dans le domaine vétérinaire, où il est important de pouvoir étaler la production des animaux d'élevage tout au long de l'année.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

cité des sciences & de l'industrie

le collège universcience

à la Cité des sciences et de l'industrie
universcience.fr

Conférences le mercredi à 18 h 30

Énergie : l'heure des choix

—

Nous avons décuplé notre consommation d'énergie au cours du siècle dernier. Sera-t-il possible de continuer à augmenter notre consommation d'énergie ? Aujourd'hui, les choix énergétiques des pays ont une forte incidence sur l'avenir de la planète. C'est pourquoi l'énergie est au centre de débats où se mêlent enjeux politiques à l'échelle nationale et mondiale, enjeux économiques, scientifiques et techniques : elle est devenue un problème de société.
Ces conférences sont proposées à l'occasion de la nouvelle exposition permanente *Énergies* présentée à la Cité des sciences.

Conseillers scientifiques : **Pierre Papon**, physicien, professeur émérite à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI) et **Daniel Clément**, directeur scientifique adjoint de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

—

17 novembre
L'énergie et ses enjeux : des ruptures scientifiques et techniques sont-elles possibles ?
Pierre Papon.

—

24 novembre
La gestion de l'énergie : vers des réseaux intelligents ?
Daniel Clément.

—

1er décembre
Énergie et géopolitique
Claude Mandil, ancien directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie et expert indépendant.

—

8 décembre
Consommation d'énergie : quelles responsabilités les entreprises ont-elles pour l'avenir ?
Table ronde avec :
Jean-François Minster, directeur scientifique de Total, **Philippe Garderet**, directeur scientifique d'Areva, **Patrick Criqui**, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPII), **François Moisan**, directeur exécutif de la Stratégie, de la recherche et de l'international, directeur scientifique de l'Ademe.

Le livre de l'exposition *Énergies*. «Vers une énergie durable ?», par Daniel Clément et Pierre Papon, sortira le 14 octobre (universcience éditions / Le Pommier) dans la nouvelle collection *Le Collège*.

Avec le soutien de
POUR LA SCIENCE
FUTURA-SCIENCES.com
Avec la Chaîne ENCYCLO
France culture

Une horloge dans le cerveau

Viviane Pouthas, Laurence Casini et Franck Vidal

On sait estimer de façon assez fiable les durées inférieures à une seconde. Des aires cérébrales spécialisées assurent cette fonction de perception du temps. Des aires non spécialisées, mais impliquées dans l'attention et la mémoire, sont également nécessaires.

L'ESSENTIEL

- **La scalarité indique que l'erreur faite sur l'estimation d'une durée est proportionnelle à cette durée. C'est le signe du bon fonctionnement de l'horloge interne.**
- **Des aires cérébrales sont spécifiques de l'horloge interne : les noyaux gris centraux et les aires motrices supplémentaires.**
- **Les aires du cortex impliquées dans l'attention et la mémoire, ainsi que le cervelet, sont aussi nécessaires à une évaluation correcte des durées.**

Le jour et la nuit rythmés par le lever et le coucher du soleil, les mois lunaires, l'année et ses saisons… Les rythmes quotidien, mensuel et annuel sont autant de synchroniseurs, de « donneurs de temps » qui règlent nos rythmes biologiques. Ils ajustent nos mécanismes endogènes aux cycles des saisons ou des photopériodes. Le plus remarquable de ces donneurs de temps est celui qui régule l'horloge circadienne (autour de 24 heures). Les diverses données acquises aujourd'hui permettent de situer cette horloge interne dans le cerveau, à la base de l'hypothalamus, dans les noyaux suprachiasmatiques.

À une autre échelle, celle des durées brèves (inférieures à la minute), le temps est également une source d'information que l'on doit percevoir avec précision afin de réagir de façon adaptée à l'environnement. Les exemples abondent. Est-ce que le silence de mon interlocuteur signifie qu'il a terminé et que je peux prendre la parole ? Est-ce que j'ai encore le temps de traverser, alors que le feu piéton clignote depuis un moment ? Je suis très chargée, mais ai-je le temps de poser mes sacs par terre avant que l'ascenseur n'arrive ?

De même, les musiciens savent régler la durée des notes – les allonger ou les raccourcir – pour créer des rythmes, des mélodies et des effets expressifs. Pourtant, alors que nous savons que nos yeux nous permettent de voir, nos oreilles d'entendre, notre nez de sentir, notre langue de goûter, nous ignorons les mécanismes qui nous permettent de mesurer le temps qui s'écoule. Comment fonctionne notre sens du temps ? Avons-nous un organe nous permettant de percevoir le temps ?

Aujourd'hui de nombreuses recherches tentent de découvrir les structures cérébrales responsables de notre perception du temps. Force est de constater que les rouages de cette horloge cérébrale sont encore mal compris. Et si les neurobiologistes parlent en termes imagés de sablier cérébral, d'interrupteur ou d'accumulateur, les descriptions sont plus métaphoriques que moléculaires ou cellulaires.

En revanche, certaines aires cérébrales de la perception du temps ont d'ores et déjà été identifiées. Nous examinerons quelles sont ces aires spécifiques de la perception du temps. Nous verrons qu'il existe également des aires non spécifiques,

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

mais tout aussi indispensables à cette perception : les zones impliquées dans la mémoire et l'attention.

La nature des mécanismes de l'horloge cérébrale a fait l'objet de nombreux travaux depuis les premières études psychophysiques réalisées au XIXe siècle. Diverses méthodes d'analyse ont précisé ces résultats : des lésions dues à un accident et dont les symptômes associés permettent de mieux comprendre la fonction normale de la zone impliquée, l'utilisation de médicaments qui bloquent ou au contraire restaurent la fonction d'une aire cérébrale ou encore l'imagerie.

Le modèle de l'horloge interne, dit du temps scalaire, prédit bien les performances temporelles de l'homme et de l'animal : grâce à cette horloge nichée dans le cerveau, « organe » de la perception du temps, nous estimons correctement la durée des événements. Cette horloge serait constituée d'une base de temps, d'un accumulateur et d'un interrupteur. Des impulsions seraient égrenées de façon continue et s'accumuleraient comme des grains de sable, au fond d'un sablier. Quand on évalue une durée, l'interrupteur déclenche le stockage de ces impulsions, et la quantité d'impulsions accumulées détermine la durée écoulée. Mais pour que l'évaluation soit correcte, il faut nécessairement que l'on fasse attention au temps qui s'écoule. En effet, les impulsions ne s'arrêtent jamais, mais si l'on n'y prête pas attention, toutes ne sont pas stockées : certaines passent inaperçues, et l'évaluation est incorrecte. On voit déjà que l'évaluation du temps exige un sablier cérébral, mais aussi des mécanismes attentionnels.

Comment estimer une durée

Ce modèle a été conforté quand on a montré que certaines régions cérébrales se comportent comme une base de temps et d'autres comme un accumulateur. Pour ce faire, les neurobiologistes ont étudié des personnes ayant des lésions cérébrales. Une des difficultés auxquelles se sont heurtés les neurobiologistes tient au fait que l'accumulateur et l'interrupteur ne fonctionnent que si le sujet évalue le temps qui passe, alors que la base de temps – les impulsions qui s'accumulent – est toujours active.

Il semble donc difficile d'imaginer des expériences où l'on parviendrait à inactiver cette base de temps afin d'en observer les conséquences. En revanche, une lésion des régions contenant la base de temps devrait profondément perturber son fonctionnement et détériorer la perception du temps chez les personnes concernées.

Rappelons en quoi consistent les expériences visant à tester la perception temporelle. On demande, par exemple, aux participants d'appuyer sur un bouton pendant une durée précise (appelée durée cible), par exemple pendant une seconde ; le sujet doit répéter plusieurs fois l'opération. Dans d'autres expériences, on fait écouter un extrait sonore au sujet et il doit choisir, entre plusieurs durées que lui propose l'expérimentateur, laquelle lui semble la plus proche de ce qu'il a entendu. Ou encore, on fait entendre un son au sujet, et il doit en reproduire la durée.

Quand on demande à un sujet d'appuyer plusieurs fois de suite sur un bouton pendant une seconde, par exemple, il commet, même s'il est bien entraîné, de petites erreurs. Parfois la durée est un peu trop longue, parfois un peu trop courte,

1. L'HORLOGE BIOLOGIQUE serait constituée d'une sorte de sablier cérébral, mis en jeu dès que l'on doit estimer une durée brève. Des « grains de sable » s'accumuleraient et la quantité accumulée déterminerait la durée écoulée. Les « grains de sable » seraient des impulsions électriques émises par les neurones de l'horloge cérébrale.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

LES AUTEURS

Viviane POUTHAS a dirigé l'Équipe Perception du temps et des rythmes : mécanismes et dysfonctionnements dans l'Unité de neurosciences cognitives et imagerie cérébrale de l'Hôpital de la Salpêtrière, à Paris.

Laurence CASINI, maître de conférences à l'Université de Provence, à Marseille, travaille dans l'Équipe Chronométrie et dynamique cérébrale au Laboratoire de neurobiologie de la cognition.

Franck VIDAL, professeur à l'Université de Provence, à Marseille, travaille dans cette même équipe.

BIBLIOGRAPHIE

W. Meck, T. Penney et V. Pouthas, **Cortico-striatal representation of time in animals and humans**, *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 18 (2), pp. 145-152, 2008.

V. Pouthas *et al.*, **Neural network involved in time perception : an fMRI study comparing long and short interval estimation**, *Human Brain Mapping*, vol. 25(4), pp. 433-441, 2005.

J. Coull *et al.*, **Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation**, *Science*, vol. 303(5663), pp. 1506-1508, 2004.

A. Ferrandez *et al.*, **Basal ganglia and supplementary motor area subtend duration perception : an fMRI study**, *NeuroImage*, vol. 19(4), pp. 1932-1944, 2003.

L. Casini et R. Ivry, **Effects of divided attention on temporal processing in patients with lesions of the cerebellum or frontal lobes**, *Neuropsychology*, vol. 13, n° 1, pp. 10-21, 1999.

F. Macar *et al.*, **Performance-dependent ERP changes in judgments of brief durations**, *Experimental Brain Research*, vol. 125, pp. 271-280, 1999.

mais si l'on fait la moyenne des réponses, le résultat est proche de la seconde, voire rigoureusement égal. De surcroît, la moyenne de ces petites erreurs est proportionnelle à la durée cible : lorsqu'un sujet commet des erreurs de l'ordre de 100 millisecondes pour une durée cible de une seconde, il commet des erreurs de l'ordre de 200 millisecondes pour une durée cible de deux secondes. C'est ce que l'on nomme la propriété de scalarité.

On peut utiliser la scalarité comme le signe du bon fonctionnement de l'horloge, ou ses anomalies comme une preuve du dysfonctionnement de l'horloge interne. De cette façon, nous pouvons différencier les expériences où la scalarité disparaît, indiquant que l'horloge dysfonctionne, de celles où la scalarité reste préservée bien que le sujet ne parvienne plus à évaluer correctement les durées.

Ainsi, nous disposons d'une façon de repérer le bon fonctionnement (ou le dysfonctionnement) de l'horloge cérébrale. Mais où se situe-t-elle ? Deux structures cérébrales ont été associées depuis longtemps au traitement des durées, car les personnes chez qui elles sont lésées présentent des déficits de perception temporelle : les noyaux gris centraux et le cervelet. Toutefois, nous allons voir que le cervelet ne doit plus être retenu comme un siège potentiel de l'horloge.

Où l'horloge est-elle localisée ?

L'intérêt suscité par le cervelet résulte d'observations réalisées chez les patients présentant des lésions de cette structure. On avait remarqué que, parmi les manifestations cliniques liées aux atteintes du cervelet, on retrouve très souvent une ataxie (des troubles de la coordination motrice), une dyschronométrie (qui se manifeste par un retard dans l'exécution des mouvements volontaires) et une adiadococinésie (difficulté à synchroniser des mouvements des deux mains). Certains en avaient déduit – à tort, nous allons le voir – que l'horloge interne est située dans le cervelet.

De même, des études consistant à utiliser des substances qui imitent ou bloquent les effets de la dopamine, neurotransmetteur indispensable au bon fonctionnement des noyaux gris centraux, ont montré que la dopamine joue un rôle essentiel dans les mécanismes d'évaluation des durées. Ces derniers sont perturbés quand on empêche la dopamine d'agir. Or on sait que les personnes atteintes de la maladie de Parkinson présentent un déficit en dopamine, cause des troubles moteurs dont elles souffrent.

Dès lors, les neurobiologistes se sont intéressés aux troubles de l'estimation temporelle chez les patients atteints de lésions du cervelet ou de la maladie de Parkinson. Ces personnes ne parviennent pas à estimer des durées brèves, quel que soit le type de tâches utilisées (qu'on leur demande d'évaluer des durées inférieures à la minute ou d'exécuter un mouvement de durée donnée). En revanche, on constate que la propriété de scalarité disparaît chez les patients parkinsoniens, alors qu'elle est préservée chez les patients présentant des atteintes du cervelet.

Qu'en conclure ? Comme la propriété de scalarité signe le bon fonctionnement de l'horloge, on déduit que cette dernière implique les noyaux gris centraux, mais pas le cervelet. Ou encore, que les déficits des patients parkinsoniens résultent d'une atteinte de l'horloge interne, ce qui n'est pas le cas des déficits des patients présentant une lésion du cervelet. En d'autres termes, les atteintes présentées dans les tâches d'estimation temporelle par les patients ayant une lésion du cervelet ne sont pas spécifiques de l'horloge (puisque la propriété de scalarité est préservée).

Cela illustre le fait que pour décider qu'une structure est impliquée dans les mécanismes de l'horloge et plus particulièrement dans sa composante « base de temps », il faut que les atteintes de cette structure provoquent un déficit dans les expériences où la durée doit être estimée. Mais bien que cette condition soit nécessaire, elle n'est pas suffisante. Prenons une image : pour juger du tempo d'un métronome, il faut ne pas être sourd. De la présence d'un déficit profond chez les sourds, on ne conclurait pas que l'oreille est responsable des mécanismes chronométriques, mais seulement que l'oreille est nécessaire pour estimer correctement un tempo. Le déficit n'est évidemment pas spécifique du temps.

Ainsi, le cervelet est nécessaire pour évaluer correctement le temps, mais le déficit observé chez les patients ayant une lésion du cervelet n'est pas spécifique de l'horloge puisque la propriété scalaire est préservée. On en déduit que le déficit cérébelleux concerne des structures situées en amont ou en aval du mécanisme d'horloge, alors

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

que le déficit induit par la maladie de Parkinson concerne l'horloge elle-même.

Les noyaux gris centraux sont impliqués dans un mécanisme chronométrique spécifique, mais rien n'indique que l'horloge soit exclusivement localisée dans les noyaux gris centraux : on n'a pas confirmé que les noyaux gris sont les seuls responsables du fonctionnement de l'horloge cérébrale. On pourrait en effet imaginer que les noyaux gris centraux font partie d'un réseau de structures dont seule la collaboration conduit à la production d'une base de temps. Pour admettre que l'horloge interne est strictement localisée dans les noyaux gris, il faudrait montrer que seule leur lésion fait perdre la propriété scalaire, ce qui nécessiterait que toutes les structures cérébrales, l'une après l'autre, fassent l'objet d'une exploration systématique, ce qui n'est pas réaliste.

D'autres mécanismes non spécifiques, mais indispensables

La perception du temps nécessite une horloge interne spécifique (les impulsions qui s'accumulent et un interrupteur qui autorise ou non leur stockage), mais aussi des mécanismes non spécifiques : une mise en mémoire des durées à estimer et un mécanisme de comparaison permettant de décider si la durée étudiée est ou non supérieure à une durée de référence. Par exemple s'il faut comparer deux sons de durées différentes, on doit les mémoriser, les comparer et ensuite décider lequel est le plus long. S'il faut produire un mouvement d'une durée précise, il faut disposer d'une mémoire de cette durée et d'un mécanisme permettant la comparaison du mouvement en cours à la durée stockée en mémoire. Ainsi, d'autres structures que les noyaux gris – en l'occurrence les aires impliquées dans la mémoire – sont indispensables, quoique non spécifiques, pour évaluer des durées ; ce pourrait être le cas d'autres structures telles que les aires préfrontales.

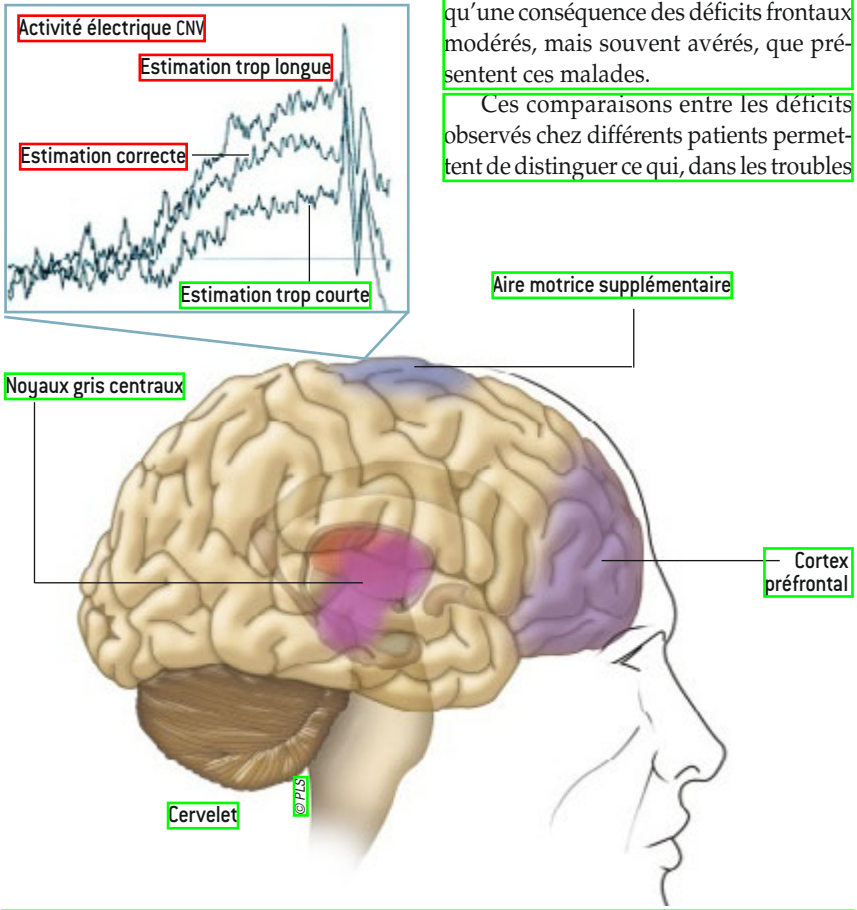
En effet, on sait que le syndrome frontal, dû à des lésions préfrontales, se manifeste notamment par des troubles de l'attention et de la mémoire à court terme. Compte tenu de ces observations cliniques, et de l'importance de ces deux processus dans l'estimation des durées brèves, on a étudié les performances temporelles de patients présentant ce type de lésions. Effectivement, ces personnes évaluent mal les durées, mais cet effet n'est pas spécifique : elles échouent dans tous les tests requérant un niveau élevé d'attention. Le cortex préfrontal joue bien un rôle essentiel lorsqu'il s'agit d'estimer des durées, mais c'est en raison de son implication dans le maintien de l'attention.

Dans une autre expérience, on a demandé à des patients de juger des intervalles courts (0,4 seconde) et des intervalles longs (4 secondes). Les patients n'échouent que lorsqu'il leur faut évaluer les intervalles les plus longs. Cela est compatible avec l'idée selon laquelle une partie de la durée est « oubliée » quand elle dure trop longtemps.

Pour explorer cette hypothèse, dans une seconde expérience, on demandait aux sujets de comparer deux durées très brèves présentées, soit l'une juste après l'autre, soit séparées par un délai de quatre secondes. Les sujets ayant un syndrome frontal présentent un déficit, mais seulement dans le second cas où ces durées sont séparées de quatre secondes. On peut en conclure que le déficit pour les intervalles de quatre secondes est dû au fait que cette durée est oubliée à mesure que le temps passe, parce qu'elle est trop longue pour leur mémoire de travail. Comme dans le cas d'une lésion cérébelleuse, le déficit temporel présenté par ces patients n'est que secondaire : le cortex préfrontal est essentiel dans les processus de maintien en mémoire à court terme de l'information temporelle et, chez eux, il est lésé.

Ainsi, les jugements temporels requièrent, en plus des mécanismes spécifiques d'horloge, des mécanismes attentionnels et mnésiques non spécifiques. On peut d'ailleurs penser que les troubles de l'estimation du temps présentés dans certaines maladies psychiatriques, telles que la schizophrénie, ne sont eux-mêmes qu'une conséquence des déficits frontaux modérés, mais souvent avérés, que présentent ces malades.

Ces comparaisons entre les déficits observés chez différents patients permettent de distinguer ce qui, dans les troubles



2. QUELQUES STRUCTURES sont spécifiquement impliquées dans la détermination des durées courtes. C'est le cas des noyaux gris centraux et des aires motrices supplémentaires. L'activité électrique enregistrée juste au-dessus des aires motrices supplémentaires (onde dite CNV, *voir le cartouche*) est d'autant plus intense que la durée est jugée longue. D'autres aires cérébrales, sont nécessaires pour que l'évaluation des durées soit correcte, mais elles ne sont pas spécifiques de l'horloge cérébrale. C'est, par exemple, le cas du cortex préfrontal.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

de la perception du temps, relève d'un déficit des mécanismes spécifiques de l'horloge interne de ce qui résulte d'un dysfonctionnement des différentes autres fonctions cognitives (attention, mémoire, décision) non spécifiques, mais nécessaires pour estimer correctement le temps. En outre, les troubles temporels mis en évidence dans diverses populations de patients laissent penser que la perception du temps ne repose pas sur l'activité d'une seule structure, mais résulte d'une collaboration entre différentes aires cérébrales dont chacune jouerait un rôle particulier.

Les recherches les plus récentes utilisant l'imagerie cérébrale ont essayé de décrire ce réseau d'aires cérébrales, de préciser leur rôle – spécifique ou non – dans les mécanismes chronométriques, et d'identifier parmi ces aires les différentes composantes de l'horloge interne.

Nous l'avons évoqué, la détermination du temps exige des mécanismes spécifiques d'« horlogerie », ainsi que des mécanismes mnésiques, attentionnels, voire décisionnels. Comment peut-on distinguer, au sein du réseau cérébral activé quand un sujet estime le temps, les aires spécifiquement impliquées dans la mesure de la durée et celles qui sous-tendent les processus non spécifiques, mais indispensables à une perception correcte du temps écoulé ? Plusieurs protocoles ont été utilisés. L'un des plus féconds consiste, par exemple, dans les études utilisant l'IRM fonctionnelle, à comparer les aires cérébrales activées lorsque les sujets doivent évaluer la durée d'éclairement d'une petite ampoule (une diode) aux aires activées lorsqu'ils doivent juger de son intensité.

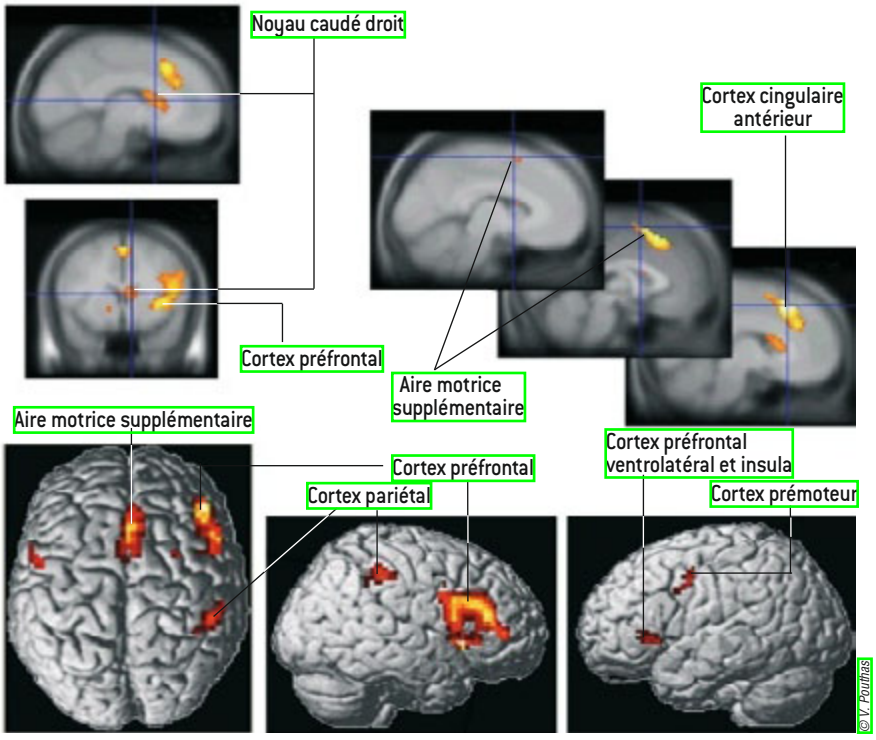
Les noyaux gris centraux remplissent le sablier cérébral

De nombreux tests permettent de comparer l'activation cérébrale enregistrée quand on doit déterminer une durée et celle obtenue quand on doit estimer un autre paramètre (par exemple une intensité lumineuse), ces deux opérations mettant en jeu des processus attentionnels et mnésiques similaires. Lorsque les sujets doivent évaluer la durée d'éclairement d'une diode, les noyaux gris centraux et d'autres aires corticales, notamment les « aires motrices supplémentaires », sont particulièrement actifs. En revanche, lorsque les sujets doivent juger de l'intensité, les structures les plus activées sont celles impliquées dans le traitement des stimulus visuels.

Dans une autre étude utilisant aussi l'IRMf, les sujets devaient en même temps estimer la durée de présentation d'un cercle coloré et sa couleur. Selon les conditions expérimentales, on demandait aux sujets de faire attention aux deux tâches ou de privilégier soit l'estimation de la durée, soit la détermination de la couleur. On a observé, d'une part, quelles étaient les structures cérébrales dont l'activité augmentait avec l'attention portée à la durée et, d'autre part, celles dont l'activité croissait avec l'attention portée à la couleur. Comme on pouvait le prévoir, seule l'activité des aires visuelles spécialement impliquées dans le traitement de la couleur croît avec l'attention portée à cet attribut. En revanche, quand les sujets prêtent davantage attention à la durée, l'activité des noyaux gris et celle de quelques régions corticales, dont les aires motrices supplémentaires, augmentent.

Toutes ces expériences montrent que les noyaux gris centraux et les aires motrices supplémentaires sont sollicités lorsque des mécanismes spécifiquement temporels sont mis en jeu. Seraient-ils responsables du mécanisme d'accumulation, de remplissage du sablier cérébral ? Pour le savoir, on a enregistré l'activité électrique cérébrale (l'électroencéphalogramme) des sujets en même temps que l'on mesurait leurs performances temporelles.

Précisons que l'enregistrement de l'électroencéphalogramme avait déjà révélé une onde lente caractéristique – la variation contingente négative, ou CNV – qui survient quand un sujet attend un stimulus devant se produire après un délai donné. On a montré que l'onde a une amplitude maximale quand elle est enregistrée au-dessus des aires motrices supplémentaires. De surcroît, pour une même durée à estimer, plus la CNV enregistrée au-dessus des aires motrices supplémentaires est ample, plus la durée estimée par le sujet est longue. C'est bien le comportement que l'on attendrait d'un accumulateur : plus il y a d'impulsions accumulées, plus la durée estimée est longue. Les connexions anatomiques étroites qui existent entre les noyaux gris et les aires motrices supplémentaires laissent supposer – de façon



3. L'IRM FONCTIONNELLE révèle les aires activées lorsqu'on demande à un sujet d'estimer une durée. On constate que les aires motrices supplémentaires, le cortex cingulaire, le cortex préfrontal, l'insula, le cortex pariétal et le noyau caudé s'activent spécifiquement.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

très schématique – que les premiers produisent les impulsions de l'horloge pendant que les secondes accumulent ces impulsions pour permettre d'estimer la durée écoulée.

Le cas de la maladie de Parkinson

Ces résultats ont été confirmés par les études faites sur les personnes atteintes de la maladie de Parkinson : la CNV est moins ample chez ces sujets que chez des sujets sains. Mais si l'on restaure le fonctionnement de leurs noyaux gris centraux, soit en leur donnant des médicaments qui rétablissent un niveau d'activité correct, soit par le biais de stimulations profondes du noyau subthalamique rétablissant un fonctionnement harmonieux de ces structures, la CNV retrouve une amplitude similaire à celle enregistrée chez des sujets sains. Cette normalisation de l'activité cérébrale s'assortit d'une restauration des performances temporelles des patients : ces anomalies de la CNV résulteraient du mauvais fonctionnement des noyaux gris centraux.

Selon ces différents résultats, l'important réseau cérébral qui s'active lors de la perception de durées brèves comprendrait plusieurs « sous-réseaux », chacun d'eux prenant en charge une fonction particulière. En effet, l'évaluation du temps qui passe requiert plusieurs fonctions élémentaires. Des aires distinctes et indépendantes seraient relativement spécialisées dans chacune des fonctions qu'elles prennent en charge (par exemple base de temps, accumulateur, interrupteur, mémoire, décision). Lorsqu'un sujet doit évaluer une durée, chacune de ces fonctions est recrutée sans doute dans un ordre qui permet de produire un comportement efficace ; chaque région cérébrale, selon sa spécialisation, entre en jeu le moment venu.

Ainsi, même si un comportement complexe requiert la collaboration de plusieurs régions cérébrales différentes, il est vraisemblable que chacune prend en charge l'une des fonctions élémentaires requises pour estimer correctement les durées : les noyaux gris centraux prendraient en charge le mécanisme de base de temps, tandis que les aires motrices supplémentaires assureraient le processus d'accumulation. Les régions frontales, peut-être associées à d'autres régions, contribueraient aux opérations de mémorisation et d'attention.

Bien que ce modèle soit privilégié par la majorité des neurobiologistes, d'autres ont été proposés, en particulier lorsqu'on s'intéresse à des durées particulièrement brèves (inférieures à une centaine de millisecondes). Dans ce cas, certains chercheurs postulent que les mécanismes d'horloge ont peu de réalité biologique et préfèrent faire l'hypothèse que le temps serait une propriété « émergente » de la circuiterie neuronale des systèmes moteurs ou sensoriels. Les propriétés émergentes sont celles qu'acquièrent les systèmes complexes, qui présentent parfois des propriétés que n'ont pas leurs éléments constitutifs. Si les différents modèles sont assez satisfaisants, et indiquent de quoi est constituée notre horloge interne, les neurobiologistes sont encore loin d'en comprendre précisément le fonctionnement.

Souvenirs & émotions façonnés par le temps

Marion Noulhiane

Le temps passe lentement quand on s'ennuie... Les émotions influent sur la perception du temps. Inversement, les émotions associées à un souvenir évoluent avec le temps. Ainsi, le temps est sous l'emprise des émotions, mais la réciproque est vraie.

La notion de temps se fonde sur un passé, un présent et un futur. Le cours du temps apparaît fluide : les événements s'enchaînent en s'inscrivant dans la mémoire. Un paramètre influe toutefois sur cette mémoire des événements : les émotions. En effet, lors d'un moment agréable – un dîner entre amis par exemple –, le temps semble passer très vite. En revanche, une dispute est ressentie comme étant longue et désagréable.

Le traitement temporel et la mémoire sont des mécanismes cognitifs étroitement liés : les fonctions mnésiques participent à la mémorisation des durées et le traitement de la durée donne une dimension temporelle à l'événement mémorisé. En 1890, dans son traité *The Principles of Psychology*, le psychologue américain William James soulignait déjà ces relations intimes qu'entretiennent les processus mnésiques et temporels, et distinguait deux composantes de la mémoire selon un facteur temporel. La mémoire primaire (ou immédiate) permettrait de percevoir le temps, l'immédiatement passé de quelques secondes qui se projette dans le présent. Elle offrirait une unité et une continuité à l'expérience consciente. La mémoire secondaire, quant à elle, correspondrait à la connaissance d'un événement auquel on ne pense plus, mais qui revient, enrichi d'une conscience supplémentaire ; cet événement apparaîtrait comme objet d'une pensée ou d'une expérience antérieure.

Ainsi, un souvenir propre requiert un sentiment général du passé, une date particulière dans ce passé, un événement localisé à cette date et la revendication que cet événement fait partie intégrante de sa vie. Comme le décrivit le neurobiologiste d'origine estonienne Endel Tulving en 1985 avec la notion de souvenir épisodique, cette mémoire permettrait en outre à l'homme de rompre avec l'écoulement irréversible du temps et de voyager dans son temps subjectif. Sur cette mémoire, s'appuierait l'estimation des durées au-delà du présent. Mais que le temps soit mémorisé en tant qu'unité perçue ou reconstruite, il serait influencé par la coloration émotionnelle des événements.

Le rôle des émotions dans les interactions du traitement temporel et de la mémoire fascine. Les émotions créeraient une distorsion du temps perçu : on distingue le temps objectif du temps subjectif, ce dernier étant encore nommé durée, laquelle dépendrait des émotions ressenties par celui qui l'évalue.

D'ailleurs, les expériences sur le traitement temporel pour des durées courtes (de l'ordre de la milliseconde ou de la seconde) montrent comment les émotions modifient le rythme de l'horloge interne – l'horloge naturelle réglée sur un rythme circadien (environ 24-25 heures) et qui détermine notamment le rythme veille-sommeil. Nous verrons qu'en accélérant ou en ralentissant, notre horloge nous informe s'il faut nous presser ou si, au contraire, nous pouvons prendre notre temps. Qui plus est, nous savons que certaines situations ennuyeuses – ou stressantes – semblent plus longues que leur durée objective. Par ailleurs, quand nous repensons à de telles situations, le temps vécu s'étend ou se contracte selon les empreintes que les événements ont laissées en mémoire. Toutefois, nous montrerons que cette coloration émotionnelle de l'événement évolue au cours du temps et peut

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

1. LES ÉMOTIONS HUMAINES – la peur, la joie, le dégoût, la surprise, la tristesse et la colère – modifient la façon dont on perçoit un événement et sa durée.

changer quand nous reconstruisons ultérieurement le souvenir de cet événement.

Aussi l'étude du temps et de ses relations avec la mémoire et les émotions prend-elle une autre dimension pour des durées longues (de l'ordre de l'heure et des années) : celle de la dynamique temporelle de la trace mnésique – du souvenir – et du rôle des émotions. Intuitivement, nous pensons que les émotions pourraient « fortifier » les souvenirs, les maintenant au cours du temps. Mais est-ce vraiment le cas ?

Des durées courtes

Voyons d'abord comment les émotions modifient les interactions du traitement temporel et des processus mnésiques pour les durées courtes, de l'ordre de la milliseconde ou de la seconde. Plusieurs protocoles expérimentaux sont utilisés. On informe (ou non) le participant que l'expérience porte sur le traitement temporel et on lui propose différentes tâches : il doit produire une durée qui lui a été indiquée en unités de temps, reproduire une durée identique à une durée préalablement écoulée, ou mémoriser une durée, puis juger si les durées présentées lors de l'expérience sont identiques, inférieures ou supérieures.

Quelle que soit la tâche utilisée pour étudier les performances de traitement temporel, la mémoire est impliquée : la mémoire de travail pour le stockage et la manipulation des durées courtes, ou la mémoire à long terme pour la récupération d'informations temporelles, telles les unités chronométriques. Les émotions interagissent avec ces processus temporels et mnésiques (des mécanismes d'attention interviennent aussi, mais nous ne les aborderons pas). Les scientifiques s'attachent à discerner la part de chaque processus et à en comprendre les interactions *(voir l'encadré page 125)*.

En laboratoire, pour ce type de protocoles, on utilise souvent des photographies d'expressions faciales qui représentent des émotions, telles la peur, la joie, la colère, la tristesse, etc. Dans la plupart des études, ces stimulus sont présentés pendant quelques millisecondes et les participants doivent par exemple qualifier de « courte » ou de « longue » la durée pendant laquelle on leur a présenté les visages.

L'ESSENTIEL

- **La durée d'un événement dépend des émotions ressenties par la personne qui l'évalue.**
- **La peur accélère l'horloge interne et pousse l'organisme à agir vite ; le temps semble s'allonger.**
- **Une personne surestime la durée d'un acte déplaisant au moment où elle le vit. Mais le caractère négatif de cet événement peut évoluer avec le temps : en y repensant, elle le trouvera banal, voire agréable.**
- **Le temps atténue le souvenir d'une émotion, surtout si elle a été désagréable.**

© Shutterstock/Ivan Montero Martinez

En général, les sujets surestiment les durées de présentation des visages exprimant la colère ou la peur, comparées aux durées de présentation (pourtant identiques) d'un visage neutre. Interprétées comme des signes d'une menace imminente, ces expressions accélèrent le rythme de l'horloge interne pour permettre à l'organisme de réagir vite et de se préparer à se défendre ; le sujet a alors l'impression que le temps ralentit. En effet, si l'horloge accélère, le « sablier biologique » se remplit plus vite et le temps – correspondant à l'écoulement du sablier – paraît plus long.

Les expressions faciales de joie et de tristesse provoquent aussi des surestimations temporelles, mais de moindre importance. En 2009, Sylvie Droit-Volet et Sandrine Gil, du Laboratoire de psychologie sociale et cognitive de l'Université Blaise Pascal, à Clermont-Ferrand, ont suggéré que la joie refléterait un mécanisme adaptatif de coopération, et la tristesse serait un appel visant à déclencher un comportement d'assistance. En revanche, toutes les émotions ne provoquent pas une accélération de l'horloge interne : par exemple, la honte, une émotion reposant sur un apprentissage culturel et social, n'a pas pour vocation d'inciter l'organisme à réagir vite.

La durée de présentation des stimulus dans ces tâches est de l'ordre de quelques millisecondes, ce qui implique un stockage et une récupération des informations temporelles et émotionnelles en mémoire immédiate. En effet, l'organisme ne pourrait pas réagir vite dans ces situations si les informations étaient stockées et récupérées en mémoire à long terme.

D'autres psychologues s'intéressent à des durées plus longues, s'étendant sur quelques secondes, en utilisant d'autres stimulus. Nombre d'auteurs s'accordent sur l'idée que les émotions seraient associées à un sentiment, nommé affect, conscient et verbalisable. Malgré la diversité des expériences émotionnelles inhérentes à cette subjectivité, deux dimensions suffiraient à en rendre compte : la valence affective – la dimension hédonique de l'émotion, c'est-à-dire sa connotation négative ou positive – et l'intensité émotionnelle – l'ampleur de l'émotion.

Pour mesurer ces deux dimensions, de nombreux travaux utilisent l'*International Affective Picture System* (IAPS, en français, le système international d'images affectives), une collection de près de 1 000 images différentes (végétation, mutilés, nourriture, animaux, objets domestiques, etc.), chacune ayant été évaluée en termes de valence et d'intensité émotionnelles. On détermine « objectivement » si une personne a réalisé un traitement émotionnel en enregistrant son activité électroencéphalographique, son rythme cardiaque et sa réaction électrodermale (la conductance de la peau due à la transpiration et qui varie avec l'état émotionnel du sujet). Ainsi, on a montré que la présentation d'une image émotionnelle, même rapide, provoque une réaction émotionnelle.

En 1997, utilisant ces images avec des durées de deux, quatre et six secondes, Alessandro Angrilli et ses collègues, de l'Université de Padoue, en Italie, ont observé que les images positives ayant une forte intensité provoquent une surestimation de la durée, alors que c'est l'inverse pour une intensité faible.

En 2007, avec mes collègues du Laboratoire de neurosciences cognitives et d'imagerie cérébrale, à Paris, nous avons utilisé un protocole semblable avec des sons émotionnels (l'*International Affective Digital Sounds*, miaulement de chat, hurlement de femme battue, ouverture de canette, etc.). Nous avons montré que la durée des stimulus émotionnels était surestimée par rapport à celle des stimulus neutres, cette surestimation étant plus grande pour les stimulus négatifs que pour les positifs. Par conséquent, un son émotionnel active l'horloge interne, qui accélère, et sa valence module l'activation. En l'occurrence, la durée d'un son négatif – par exemple les pleurs d'un bébé – semble plus longue que celle d'un son positif – un air de musique classique *(voir la figure 2)*.

Ces effets émotionnels n'existent que pour des durées de présentation du son inférieures à deux secondes. L'influence des émotions sur le temps subjectif serait éphémère. Pour quelle raison ? Il est probable que la trace mnésique du son en mémoire de travail, marquant l'instant présent, disparaisse. Au-delà de cette durée, l'émotion et l'intervalle temporel qui lui est associé seraient reconstruits en mémoire à long terme, et ils pourraient être modifiés au cours du temps. Voyons ce qu'il en est.

Au-delà des secondes

Les relations entre le temps, la mémoire et les émotions prennent une tout autre dimension quand il s'agit de durées longues, tels des jours, des semaines, des mois et des années. Conserver la mémoire des événements personnels passés serait essentiel au sentiment d'identité. En 1890, James définissait la mémoire du passé en mettant en exergue sa dimension phénoménologique : « La mémoire requiert plus que la simple datation d'un fait passé […]. Il doit être daté dans mon passé […]. Il doit avoir une chaleur et une intimité. »

Intuitivement, nous partageons l'idée que les émotions pourraient favoriser la consolidation mnésique des souvenirs, le stockage des événements et leur stabilisation en mémoire à long terme. Néanmoins, le rôle des émotions dans la dynamique temporelle de la trace mnésique reste à clarifier, notamment en fonction des différentes composantes émotionnelles que sont la valence et l'intensité.

2. LES PLEURS D'UN BÉBÉ semblent une éternité pour une maman, même s'ils ne durent que quelques secondes. Les émotions modifient la perception du temps, les négatives l'allongeant.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

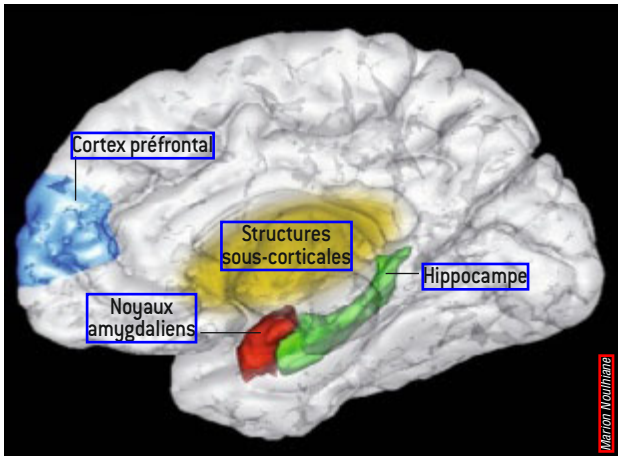
LA MÉMOIRE ET LE TEMPS

Les études menées en neuro-imagerie fonctionnelle et en neuropsychologie ont mis en évidence des régions cérébrales sous-tendant les traitements temporels, mnésiques et émotionnels selon diverses gammes de durées.

Le traitement des courtes durées (millisecondes à quelques secondes) impliquerait un stockage à court terme de l'information : le cortex préfrontal *(en bleu)* est une structure cruciale pour la mémoire de travail qui maintient et manipule l'information pour une utilisation immédiate. S'y associent d'autres régions impliquées dans des traitements temporels rapides d'ordre séquentiel ; par exemple, les structures sous-corticales *(en jaune)*, dont les ganglions de la base, jouent un rôle essentiel.

Le traitement des durées longues (quelques secondes, minutes à années) suppose une reconstruction mnésique à long terme. L'hippocampe *(en vert)* est une structure cruciale dans la mémoire épisodique, système de mémoire à long terme qui permet l'encodage, le stockage et la récupération d'informations personnellement vécues, situées dans leur contexte temporel et spatial. Elle correspond à la mémoire des souvenirs dont la récupération nécessite la possibilité de « voyager mentalement dans le temps ». L'impression de revivre les événements personnellement vécus est associée à une conscience dite autonoétique des expériences intégrées dans la continuité d'un temps subjectif, qui va du passé vers le futur. Le rôle de l'hippocampe serait de recréer un lien lors du rappel permettant de récupérer la date et le lieu de l'événement stocké en mémoire. Le cortex préfrontal contribuerait aussi à cette capacité en organisant notamment la recherche en mémoire ; de fait, l'ensemble de ce réseau cérébral permet de situer à nouveau l'âge et le lieu de notre premier jour d'école par exemple, et de récupérer cet événement comme si nous le revivions (conscience autonoétique) avec des détails épisodiques (contexte spatial et temporel, sentiments, etc.).

Au carrefour de ces structures, les noyaux amygdaliens *(en rouge)* interviennent dans la coloration émotionnelle, quelle que soit la gamme de durées considérée.



Pour étudier comment se maintient dans le temps le lien entre les émotions et la richesse des souvenirs, les neurobiologistes proposent à des participants d'évoquer un souvenir, le plus souvent ancien (un événement de l'enfance par exemple). Mais ce genre de protocole ne permet pas aux scientifiques de suivre les modifications émotionnelles du souvenir en fonction du temps. En effet, la trace mnésique peut emprunter des chemins distincts depuis l'expérience de l'événement jusqu'à son évocation, et donc s'accompagner de sentiments différents à chaque rappel.

À ce jour, on ignore quel intervalle de temps exact est susceptible de moduler les interactions de la mémoire et des émotions. Les données précisant l'influence du caractère émotionnel d'un événement sur le devenir de sa trace mnésique en termes de durée, de maintien, de renforcement ou d'atténuation dans le temps sont à clarifier.

Toutefois, en 1932, le psychologue américain Hulsey Cason présentait les premiers résultats concernant le rôle des émotions dans l'évolution des souvenirs au cours du temps. Il demandait aux participants de décrire des événements personnels survenus lors de la semaine précédant l'étude et d'indiquer leur état émotionnel, non seulement au moment des événements, mais aussi quand ils les racontaient (3 et 24 jours après).

Les résultats montrent que l'intensité des jugements est moins importante pendant les deux phases d'étude qu'au moment des événements : l'intensité émotionnelle s'atténuerait avec le temps, cette diminution étant plus importante pour les souvenirs d'événements désagréables que pour ceux d'événements agréables.

En outre, Cason montrait que la proportion d'événements désagréables rappelés était plus faible que celle des souvenirs agréables. En revanche, le nombre de souvenirs d'événements neutres augmentait à chaque évaluation, et ce, dès le rappel à trois jours. Ainsi, les souvenirs d'événements agréables, et surtout désagréables, deviendraient neutres au cours des rappels. Il y eut, de fait, peu d'expériences déplaisantes restant désagréables lors des rappels. Et 12 pour cent des expériences déplaisantes s'étaient même transformées en souvenirs agréables. Ces changements de valence ne concernaient cependant que les événements à faible intensité émotionnelle, car ceux dont l'intensité était élevée conservaient une valence identique, même après 24 jours.

En s'inspirant de cette étude, David Holmes et ses collègues, du Centre de la personnalité et du comportement social, dans le New Jersey, montrèrent en 1970 que les expériences pour lesquelles l'intensité émotionnelle décroît entre le jour de l'événement et le jour du rappel seraient plus

L'AUTEUR

Marion NOULHIANE est enseignante et chercheuse en neurosciences à l'Université Paris Descartes et dans l'Unité INSERM UMR 663 Épilepsie de l'enfant et plasticité cérébrale de l'Hôpital Necker à Paris. Les travaux présentés ici ont été réalisés au Laboratoire de neurosciences cognitives et d'imagerie cérébrale (LENA CNRS UPR 640) à Paris et au Laboratoire de psychologie et neuropsychologie cognitives à Boulogne, en collaboration avec les étudiants de l'Université Paris Descartes.

3. UNE DISPUTE ENTRE CONJOINTS est désagréable au moment où elle est vécue *(a)*. Mais en se la remémorant quelques heures plus tard, les protagonistes se sentent déjà apaisés *(b)*. Quelques semaines plus tard, ils pourront même rire de la situation *(c)* ; les sentiments évoluent avec le temps.

facilement oubliées. De plus, les expériences désagréables perdraient davantage en intensité que les souvenirs agréables.

Puis, en 1997, Richard Walker et ses collègues, de l'Université d'État du Kansas, ont introduit des intervalles de rétention des souvenirs plus importants et plus nombreux (trois mois, un an et 4,5 ans). Ils ont observé, d'une part, que plus l'intervalle augmente, plus l'intensité émotionnelle diminue et, d'autre part, que l'intensité émotionnelle au moment du rappel indique bien comment le souvenir a évolué en mémoire.

Oublier les mauvais souvenirs

Ils ont aussi montré qu'on se souvient davantage des souvenirs d'événements agréables que des souvenirs désagréables, au bout de trois mois, mais que ce n'est plus le cas après 4,5 années. Pourquoi l'intensité émotionnelle d'un mauvais souvenir diminue-t-elle plus vite ? En fait, l'influence de l'événement désagréable serait moins importante que ce qu'on imagine au départ. On s'expose souvent à nos expériences vécues (en en parlant par exemple), et cette répétition augmenterait les évaluations positives : les expériences désagréables deviendraient progressivement neutres et moins intenses, et les événements agréables prendraient de l'importance.

Les événements émotionnels seraient plus présents à l'esprit, feraient davantage l'objet de répétitions mentales et seraient plus souvent racontés à l'entourage. Par ailleurs, certains scientifiques proposent que les événements négatifs mobilisent plus de monde et que la réactivation des souvenirs, par le partage social ou les ruminations mentales par exemple, fortifierait et stabiliserait les associations entre les différents éléments des souvenirs.

Ces mécanismes de répétitions et de partage social des événements émotionnels auraient un double effet : d'une part, les répétitions éviteraient aux souvenirs d'être oubliés (plus ils sont répétés, plus ils sont consolidés) et, d'autre part, elles modifieraient le jugement émotionnel sur le souvenir (par une diminution de l'intensité des souvenirs désagréables et une stabilisation de celle des souvenirs agréables). Les souvenirs d'événements désagréables étant souvent plus répétés, ils deviendraient progressivement neutres et, par conséquent, moins présents à l'esprit que les souvenirs agréables *(voir la figure 3)*.

Le traitement temporel représente une fonction capitale de la vie quotidienne, qui s'exprime différemment selon les activités dans lesquelles on est engagé et la coloration émotionnelle qui les caractérise. Longtemps portés sur la mémoire du passé, nous nous intéressons de plus en plus, dans mon laboratoire, à la mémoire en tant que système dynamique, qui évolue avec le temps dans ses aspects normaux et avec des dysfonctionnements cérébraux, notamment chez les patients souffrant d'épilepsie. Comprendre la dynamique temporelle de l'évolution des souvenirs et ses fondements neuronaux est un de nos enjeux majeurs pour clarifier la réorganisation cérébrale dans un cerveau en souffrance, mais qui s'efforce de stocker les événements quotidiens.

Les connaissances actuelles en neurosciences et en psychologie s'accordent sur l'idée que les émotions structurent la perception du temps, organisent la mémoire et donc la façon dont on comprend la réalité. Mais paradoxalement, elles introduisent aussi des distorsions de la réalité, certainement essentielles à l'individualisation. En somme, l'émotion allège le temps et le temps apaise le souvenir de l'émotion. ■

✔ BIBLIOGRAPHIE

S. Droit-Volet et S. Gil, **The time-emotion paradox**, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, vol. 12, pp. 1943-1953, juillet 2009.

S. Gil et S. Droit-Volet, **Le sens du temps sous l'emprise des émotions**, *Cerveau & Psycho*, n° 32, pp. 45-47, mars-avril 2009.

M. Noulhiane *et al.*, **How emotional auditory stimuli modulate time perception**, *Emotion*, vol. 7, pp. 697-704, novembre 2007.

A. Angrilli *et al.*, **The influence of affective factors on time perception**, *Perception and Psychophysics*, vol. 59, pp. 972-982, 1997.

W. R. Walker, R. J. Vogl et C. P. Thompson, **Autobiographical memory : unpleasantness fades faster than pleasantness over time**, *Applied Cognitive Psychology*, vol. 11, pp. 399-413, 1997.

E. Tulving, **How many memory systems are there ?**, *American Psychologist*, vol. 40, pp. 385-398, 1985.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

La maladie d'Alzheimer peut détruire quarante ans d'amour...

...vous avez le pouvoir de la vaincre en soutenant la recherche française.

Chaque année des milliers de familles sont victimes de la maladie d'Alzheimer.

La Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer (LECMA) est une association française pour la recherche médicale, régie par la loi de 1901, à but non lucratif. LECMA finance des programmes de recherche visant la découverte d'un diagnostic et d'un traitement efficace de la maladie d'Alzheimer. Elle informe le grand public en organisant des actions d'information et d'éducation sur la prévention, le diagnostic et le traitement de la maladie.

Pour apporter des informations et des conseils pratiques à tous ceux qui sont ou se sentent concernés par la maladie d'Alzheimer, LECMA édite régulièrement des brochures d'information. Voici les brochures à votre disposition :

- Comprendre la maladie d'Alzheimer. Ce n'est pas seulement une question d'oubli
- Comment mieux aider les personnes qui entourent les patients : gestion du stress
- La déambulation et le patient atteint d'Alzheimer
- Prévenir la maladie d'Alzheimer : est-ce possible ?
- Conduire en toute sécurité au 3ème âge

Ces brochures sont consultables et téléchargeables sur notre site **www.maladiealzheimer.fr**
Si vous souhaitez les recevoir, contactez-nous par téléphone, par courrier ou par courriel.

➤ **Soutenez la recherche et envoyez votre don* par chèque à LECMA - 94 rue La Fayette 75010 Paris.**

* Votre don vous donne droit à une déduction fiscale de 66 % dans la limite de 20 % de votre revenu imposable.

L.E.C.M.A

Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer

POUR TOUTE INFORMATION

- appelez-nous au **01 42 46 50 86**
- écrivez-nous à **LECMA - 94 rue La Fayette - 75010 Paris**
- consultez notre site **www.maladiealzheimer.fr**
- envoyez-nous un courriel à **info@maladiealzheimer.fr**

Le temps d'une culture à l'autre

Certaines sociétés traditionnelles accordent plus d'importance à l'espace qu'au temps. Bien que rythmée par les cycles naturels, leur vie semble hors du temps linéaire qui nous est familier.

Éric Navet

Dans son ouvrage *God is Red*, publié en 1975, le philosophe sioux Vine Deloria oppose les conceptions occidentale et amérindienne des rapports au temps et à l'espace. En Occident, c'est le temps, l'histoire, qui importent : « L'essence profonde de l'identité occidentale implique l'hypothèse que le temps procède de façon linéaire. » La publicité – une des expressions contemporaines de cette identité – traduit bien cette fuite en avant : « Phillips, c'est déjà demain ! » ; « Paris, une longueur d'avance ! ». À considérer les multiples réformes dont les institutions sont l'objet, on peut penser que la civilisation occidentale, non seulement accorde la plus grande importance au temps, mais ne peut être elle-même que dans le changement.

À l'inverse, chez les Amérindiens, l'espace prime sur le temps. Certes, leur vie est rythmée par les cycles du jour et de la nuit, des saisons, des récoltes, mais alors que les sociétés occidentales jalonnent leur histoire de dates marquantes, les sociétés amérindiennes se réfèrent à l'itinéraire de leurs groupes, la succession des lieux qu'ils ont occupés, comme l'explique V. Deloria : « Les Indiens d'Amérique

1. L'ATTRAPEUR DE RÊVE *(dream catcher)*, objet traditionnel amérindien, retient dans sa toile les cauchemars et ne laisse passer que les bons rêves, ceux qui transportent l'être hors de la durée et de l'espace.

considèrent leurs terres – les lieux – comme ayant la plus haute signification possible, et toutes leurs déclarations s'appuient sur cette référence. Les immigrants considèrent le mouvement de leurs ancêtres à travers le continent comme une progression régulière d'événements et d'expériences essentiellement bénéfiques, plaçant ainsi l'histoire – le temps – sous le meilleur éclairage. »

Quelle philosophie sous-tend ce mode de vie et comment se traduit-elle dans la vie de tous les jours ? Comment les conceptions occidentale et traditionnelle du temps et de l'espace peuvent-elles cohabiter ? Telles sont les questions que nous examinons ici.

Lorsque l'espace prend le pas sur le temps

La prédominance de l'espace sur le temps se retrouve dans d'autres sociétés traditionnelles de par le monde. Sylvie Poirier, ethnologue, écrit en 1996 que chez les Kukatja, peuple du désert occidental australien, « sur le plan historique, le repère spatial importe davantage que le repère temporel » ; ils « ignorent l'idée de temps, ils pensent en termes de déploiement dans un espace socio-cosmique ». De génération en génération, ils se transmettent, sous la forme de mythes et de rêves, la connaissance des lieux qui ont marqué la vie de leurs ancêtres : telle source auprès de laquelle ils ont vécu un temps, tel rocher, près duquel un membre du groupe a été blessé, etc. *(voir la figure 4)*.

Ces mythes et rêves font partie d'une tradition beaucoup plus vaste – le *Tjukurrpa*, traduit en anglais par *Law* (loi) –, qui s'applique à tous les domaines de la culture : pratiques rituelles, initiatiques et funéraires, réseaux d'échange et d'alliance, affiliations territoriales, règles de mariage et systèmes de classification, interdits, récits mythiques, préparation et partage de la nourriture. Transmis de génération en génération, le *Tjukurrpa* n'est pas immuable pour autant. Il s'enrichit de nouvelles lois, de nouveaux rêves au fil des événements vécus par le peuple.

Cet ensemble de règles de vie garde ainsi à la fois une certaine forme d'intemporalité tout en restant en phase avec le vécu des aborigènes : « Le discours aborigène le présente comme un ordre intemporel […]. Cet ordre qui semble étranger au temps ne cesse toutefois de s'actualiser dans le présent et de se manifester à travers l'interaction des hommes entre eux et avec leur environnement. Le *Tjukurrpa* ne saurait signifier uniquement un ordre mythique transcendant et originel […], non plus qu'il ne peut s'inscrire sur une échelle linéaire du passé, du présent et du futur. Suivant les représentations locales, il ne saurait être question de deux temporalités, l'une qui découlerait du vécu, l'autre du *Tjukurrpa*. La réalité *tjukurrpa* et celle du vécu se complètent mutuellement en se révélant l'une à l'autre au fil des événements, des expériences et des besoins. »

De même, quand les Mélanésiens parlent d'eux, c'est l'itinéraire de leur groupe qu'ils racontent : leur histoire est l'histoire géographique de leurs déplacements. En Nouvelle-Calédonie, par exemple, les Kanak nomment chaque lieu – montagne, crête, col, ruisseau, habitat. Plus que de simples repères géographiques, certains de ces noms se substituent à ceux des ancêtres qui les ont occupés : noms d'ancêtres et noms de lieux se relaient dans une suite qui mémorise le parcours du groupe. « Le temps se ramène ainsi à l'occupation d'un endroit et à la distance parcourue entre deux lieux de résidence » explique en 1997 Alban Bensa, anthropologue à l'EHESS et spécialiste du monde kanak.

Privilégier le temps cyclique

Dans ces sociétés, le temps n'est pas absent pour autant. Les peuples traditionnels façonnent leur temps social sur le modèle des cycles naturels, des alternances : celui des saisons, le rythme nycthéméral (jour et nuit), les rythmes biologiques… Ainsi en est-il des Amérindiens auxquels je me suis intéressé depuis près de 40 ans, les Ojibwé du Canada et les Teko (Emerillon) de Guyane française, dont la vie est rythmée par la course du Soleil et l'alternance d'activités intenses de subsistance (chasse, pêche, culture…) et de moments de détente, même si la temporalité occidentale est aussi présente, à cause de la scolarisation ou lorsque certains prennent un travail *(voir l'encadré page 131)*.

La vie elle-même est perçue comme un cycle : la mort n'est pas un anéantissement, mais un passage dans le monde des esprits. Dans certaines sociétés, l'être passera peut-être par plusieurs cycles de vie

L'ESSENTIEL

- ✔ Certaines sociétés traditionnelles accordent plus d'importance à l'itinéraire de leur groupe qu'à son repérage dans le temps.
- ✔ Se refusant ainsi à l'histoire, elles fondent leur vie sociétale sur les cycles naturels.
- ✔ Le rythme du monde lui-même est perçu comme circulaire, sans commencement ni fin.
- ✔ Loin de disparaître face au temps linéaire de l'histoire occidentale, ce rapport au temps fait des adeptes jusqu'en Occident.

© Shutterstock/Anna Ekaterina

Eric Nanci

2. COMME TOUS LES PEUPLES AMÉRINDIENS, les Ojibwé, peuple de la région des Grands Lacs, organisent régulièrement des *pow wows*, réunions où l'on danse en costume traditionnel au rythme des chants et des tambours. Ces moments où la musique transporte hors du temps ont de plus en plus d'adeptes.

3. CHEZ LES OJIBWÉ, la tortue, lente par nature, est la messagère privilégiée des *manidos* (les esprits), celle qui les fait venir le plus vite lors d'un rituel dit de la tente tremblante, au cours duquel on convie les esprits pour soigner un désordre physique ou mental, retrouver une personne ou un objet égaré, prévoir l'avenir, etc.

– des réincarnations – avant d'atteindre ce monde. Chez les Teko de Guyane, on dit que les chamans (les *padze*) se réincarnent en anacondas, et on s'interdit donc de tuer ces serpents. Plus généralement, chez les Amérindiens, les étapes du développement de l'individu sont marquées par une série de rituels – rituel d'attribution du nom, rituel de puberté, rituels d'initiation, tel celui du premier gibier tué. Avec le cycle des fêtes associées aux saisons, les cycles de la végétation et ceux de reproduction du gibier, ces rituels contribuent à privilégier une conception cyclique du temps.

Dans son ouvrage *L'héritage spirituel des Indiens d'Amérique* (1996), l'anthropologue américain Joseph Epes Brown constate la relation entre le temps cyclique des Indiens et leur conception globale de l'existence : « Selon les coutumes traditionnelles indiennes, le temps est vécu davantage comme un phénomène cyclique et rythmique que comme un phénomène linéaire et tendant vers un "progrès". Dans son mode de fonctionnement, le rythme du monde est perçu comme circulaire, au même titre que la vie. Les événements et le déroulement des choses transmis par les traditions orales ne sont pas relatés en termes de temps passé et futur au sens linéaire. D'ailleurs la plupart des langues indiennes n'ont pas de déclinaisons passées et futures ; elles reflètent la réalité éternelle de l'instant. Par exemple, les récits mythiques de création ne rendent compte d'aucun passé chronologique, mais plutôt d'un processus qui se déroule indéfiniment. Les mêmes événements se reproduisent aujourd'hui et se reproduiront dans d'autres cycles à venir. »

Pas une, mais des histoires

Les mythes de création amérindiens et ceux d'autres peuples traditionnels (africains, océaniens, etc.) ne font en effet pas référence à un en deçà temporel – un temps reculé comme dans les religions dites révélées –, mais à un au-delà intemporel, tel un rêve, où temps et espace sont abolis – un monde invisible peuplé d'esprits où tous les êtres vivent en harmonie. Les Indiens Ojibwé de la région des Grands Lacs, par exemple, ne disent pas que *Kitche Manitou* créa le monde, mais qu'il « reçut une vision », celle d'un monde « beau, ordonné et harmonieux » qu'il ressentit le besoin de matérialiser. La tradition ojibwé n'assigne donc pas un point alpha à l'origine du monde. Comment imaginer une vie qui ne soit pas ordonnée selon un passé, un présent et un futur ? Pourtant, dira-t-on avec raison, toutes les sociétés humaines sont dans une histoire, avant d'être intégrées peu ou prou dans l'histoire occidentale.

C'est la remarque que fit l'anthropologue Claude Lévi-Strauss dans son *Anthropologie structurale deux* (1973) : « Il est vain de poser le problème des sociétés "sans histoire". La question n'est pas de savoir si les sociétés dites "primitives" ont ou n'ont pas une histoire au sens que nous donnons à ce terme. Ces sociétés sont dans la temporalité comme toutes les autres, et au même titre qu'elles, mais à la différence de ce qui se passe parmi nous, elles se refusent à l'histoire, et elles s'efforcent de stériliser dans leur sein tout ce qui pourrait constituer l'ébauche d'un devenir historique. »

Il y a donc non pas une, mais des histoires. Déjà dans l'*Anthropologie structu-*

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

rale (1958), Lévi-Strauss distinguait des sociétés froides « s'efforçant de stériliser dans leur sein le devenir historique » et les sociétés chaudes produisant une « histoire thermodynamique » et cumulative. Il reprend l'idée en 1973 : « En un mot, ces sociétés qu'on pourrait appeler "froides", parce que leur milieu interne est proche du zéro de température historique, se distinguent, par leur effectif restreint [...] des sociétés "chaudes" apparues en divers points du monde à la suite de la révolution néolithique, et où des différenciations entre castes et entre classes sont sollicitées sans trêve, pour en extraire du devenir et de l'énergie. »

Le rapport au temps des sociétés traditionnelles s'inscrit donc dans un contexte plus global : celui de la culture. Les sociétés traditionnelles partagent un mode d'être, de penser et d'agir qui, s'il les définit comme telles, n'est pas leur apanage et constitue plutôt un ensemble de dispositions, d'attitudes (sociales, écologiques...) potentiellement partagées par l'humanité.

Leur vertu maîtresse est la capacité d'adaptation, une aptitude qui leur a permis de répondre aux contraintes imposées par les transformations de l'environnement et la colonisation occidentale. On observe aussi dans ces sociétés communautaires une quête constante, à tous les niveaux de la culture, d'équilibre entre l'ensemble des composantes du monde : humaines et non humaines, conscientes et inconscientes, visibles et invisibles, vivantes et mortes... Ce souci traduit un mode d'être fondé sur des valeurs de respect, d'échange et de communication tant à l'égard des hommes qu'à celui de la nature. Il explique aussi pourquoi les Amérindiens perçoivent tout changement comme une menace.

L'AUTEUR

Eric NAVET est directeur du Département d'ethnologie et du Centre de recherches interdisciplinaires en anthropologie de l'Université de Strasbourg.

UN JOUR CHEZ LES INDIENS TEKO, EN GUYANE...

C'est la saison sèche dans la forêt tropicale guyanaise, le mois de septembre chez nous. Il n'est pas six heures du matin, la brume couvre encore le village teko et la rivière Camopi. Le silence. Les animaux de la nuit se sont tus. Une silhouette descend l'escalier du *carbet*, la maison familiale, puis se dirige vers le *degrad*, là où les canots sont amarrés ; elle pose une serviette sur les planches et s'immerge dans l'eau pour la toilette du matin. Chacun prendra son tour, respectant l'intimité de ses voisins. Une femme, puis deux, raniment les feux sur lesquels elles vont préparer le *takaka*, la soupe de manioc pimentée, le petit déjeuner. Quelques hommes préparent les canots pour conduire leurs enfants à l'école, de l'autre côté du fleuve. Bientôt, des hommes vont se rassembler sur la *oka*, la place du village ; certains sont venus des hameaux voisins, d'autres sont des amis, des parents qui vont aider l'un des leurs à préparer l'abattis, l'espace – souvent non loin du fleuve – où sont plantés légumes et fruits. C'est un *mayuri*, une séance de travail collectif, qui se prépare.

De l'aube à midi – ici, quatre heures de travail journalier (chasse, pêche ou culture) suffisent à assurer les besoins des familles et de la communauté –, ils vont tailler les arbustes, abattre les arbres, brûler, pour ménager des espaces où les femmes planteront surtout du manioc et, plus tard, feront la récolte. Le travail – le *mayuri* est peut-être la seule tâche qu'on puisse qualifier ainsi – est entrecoupé de pauses prolongées pendant lesquelles, assis sur un tronc, le sabre posé à côté, on boit le *cachiri*, la bière de manioc que quelques femmes ont apportée dans des seaux.

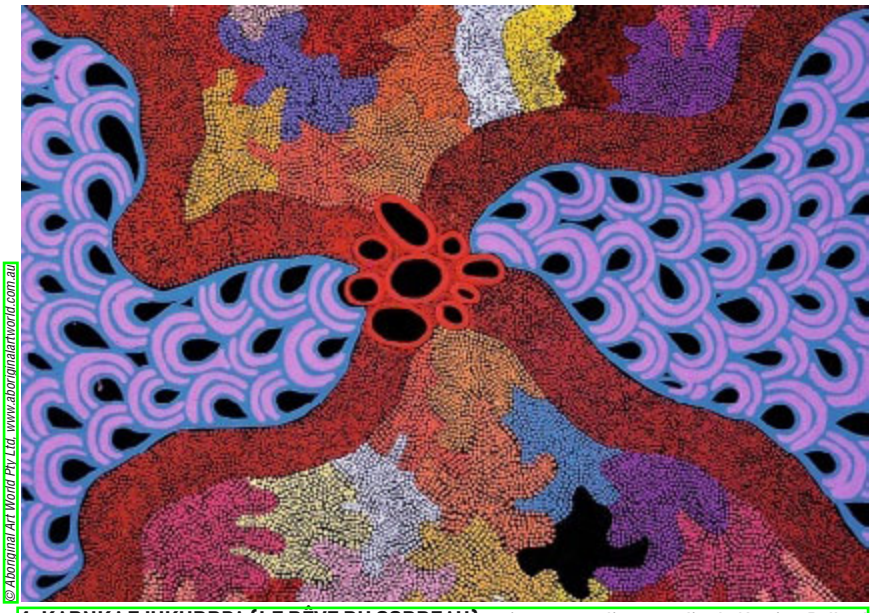
À midi, le soleil est haut et il chauffe ; on rentre au village où l'on va se baigner d'abord, puis boire un peu encore, s'animer jusqu'à ce que la fatigue conduise vers les hamacs pour une sieste prolongée. La vraie fête qui accompagne nécessairement les efforts commence en fin d'après-midi ; la mère de la famille ayant bénéficié de l'effort collectif du jour – à charge de revanche – distribue le *cachiri* jusqu'à la nuit et au-delà. Peut-être préparera-t-on des clarinettes *tule* pour danser un peu... Et la nuit revient, les cigales emplissent la forêt de leur lancinante stridulation, les singes hurleurs commencent leur concert, et c'est, à nouveau, le repos... Ici, le temps s'adapte aux êtres humains et les rythmes naturels sont ceux que la nature impose, l'alternance du jour et de la nuit, les saisons, mais aussi ceux du corps, le corps reposé, le corps au labeur, le corps libéré...

Éric Navet

Éric Navet

Un Indien Teko fabriquant une canne à pêche *(en haut)*. Bien qu'il porte une montre, l'heure qu'elle indique lui importe peu. Il privilégie son rythme biologique et ceux imposés par la nature. Avec la pêche et la chasse, la culture est une des activités du matin : les hommes défrichent un terrain – l'abattis – *(en bas)* où les femmes feront les plantations.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



© Aboriginal Art World Pty Ltd, www.aboriginalartworld.com.au

4. KARNKA TJUKURRPA (LE RÊVE DU CORBEAU), peinture acrylique sur lin de Katrina Pollard Nampitjinpa, une jeune aborigène vivant dans le désert occidental australien : des corbeaux *(en rouge et noir au centre)* s'abreuvent à une source abondante. Ce rêve, qui lui a été transmis par son père et son grand-père, est associé à un lieu précis du désert que seuls les possesseurs du rêve peuvent retrouver. Chaque rêve constitue ainsi une sorte de carte d'une région du désert empreinte de références liées à l'histoire du peuple : l'espace prend le pas sur le temps.

Les mythes de création amérindiens racontent tous comment les êtres humains sont passés d'un état paradisiaque – la « Terre sans mal » des Tupi-Guarani, peuple d'Amérique du Sud – à une vie essentiellement définie par les contraintes biologiques, spatiales et temporelles. Arrêter le temps, circonscrire l'espace apparaissent, dans les sociétés traditionnelles, comme des préoccupations majeures, comme la condition d'un retour possible au meilleur des mondes. Le rêve, le voyage chamanique, ou la quête de la vision chez les Indiens d'Amérique du Nord, avec, souvent, un recours aux psychotropes, permettent ce voyage au-delà du temps et de l'espace.

Ce désir d'éternité n'est pas si éloigné de la quête du paradis, explique l'historien roumain Mircea Eliade (1907-1986) dans son *Traité d'histoire des religions* (1964) : « Nous nous trouvons en face d'un désir et d'une espérance de régénérer le temps dans sa totalité, c'est-à-dire de pouvoir vivre – "vivre humainement", "historiquement" – dans l'éternité, par la transfiguration de la durée en un instant éternel. Cette nostalgie de l'éternité est en quelque sorte symétrique de la nostalgie du paradis. »

L'Occident a essayé, sous les différentes formes de la colonisation (culturelle, spatiale…), de briser les cycles qui rythment l'existence des peuples traditionnels. Dès le XVI^e siècle en Nouvelle-France, des jeunes filles et des jeunes garçons amérindiens hurons, algonquins, iroquois – qualifiés alors et pour longtemps de « sauvages » – furent placés sous la houlette des religieux et des religieuses pour leur apprendre les « bonnes manières » des chrétiens blancs. En Amérique du Sud, cette mission évangélisatrice, inséparable d'une œuvre conçue comme « civilisatrice », fut développée de façon spectaculaire aux XVII^e et XVIII^e siècles dans les missions (« réductions ») fondées par les Jésuites en pays guarani.

Le temps occidental ne s'impose pas

Aux XIX^e et XX^e siècles, inspirés et justifiés par l'idéologie évolutionniste, les gouvernements canadiens et américains entreprirent eux aussi de « civiliser » les « primitifs » en leur enseignant les principes du capitalisme. À une philosophie du silence, de la méditation et de l'action immédiate, on tenta de substituer une idéologie du travail, de la production et de la consommation symbolisée par l'idée de progrès, puis de développement. Toute entreprise non rentable, ne s'inscrivant pas dans la durée et n'annonçant pas des lendemains qui chantent était jugée stérile, inefficace, du temps perdu…

Ce temps linéaire dans lequel les Occidentaux ont inscrit les peuples traditionnels a souvent abouti – et aboutit encore – à la réduction d'une diversité culturelle aussi nécessaire que la biodiversité, dont elle n'est qu'un aspect. Néanmoins, si de nombreux paysages, espèces et cultures ont disparu dans la tourmente coloniale, l'écrivain et philosophe américain Jamake Highwater conclut à l'échec du processus : « Curieusement, en dépit de toutes les techniques qui sont à notre disposition, à la fin de ce XX^e siècle, pour rapetisser le monde, ces "primitifs" qu'on prétendait en voie de disparition sont toujours là et se multiplient non seulement en tant que producteurs de cultures et de styles de vie, mais en tant que source persistante d'influence sur la totalité des interactions de l'histoire humaine. Et, ce qui est très intéressant, cet impact n'est pas le résultat d'une volonté missionnaire ; il est, dans une large mesure, non intentionnel. »

Aujourd'hui encore, malgré l'école blanche, malgré l'urbanisation croissante, les Amérindiens et autres peuples traditionnels restent attachés à des valeurs essentielles qui sont autant de marqueurs d'une identité autochtone bien visible : le sens communautaire, l'esprit de partage, etc. Parmi ces attitudes face à la vie et à ses défis figure le rapport au temps, au point que les Amérindiens eux-mêmes, conscients de ce trait culturel, ont inventé, non sans humour, l'expression *Indian Time*, « le temps indien ».

« L'avenir n'est pas quelque chose qui préoccupe beaucoup l'Indien », m'écrivait une amie ojibwé ; aujourd'hui encore, il est rare de voir un Amérindien pressé – sauf dans des circonstances bien particulières comme la traque du gibier qui peut provoquer une course effrénée – ou obsédé par la montre. La ponctualité est une qualité occidentale que les Indiens n'adoptent que par politesse envers ceux qui ne partagent pas la même disposition. Employée par un jeune amérindien, l'expression *Tomorrow is another day* (Demain sera un autre jour) définit un idéal : être aussi complètement que possible dans le présent et le vivre intensément, parfois jusqu'à l'excès.

À la fin du XIX^e siècle, au cours d'une rencontre, le chef sioux Sitting Bull fit cette réflexion : « Unissons nos esprits afin de voir quel avenir meilleur nous pouvons construire pour nos enfants. » Un siècle plus tard, comme en écho, James Mason, un chef ojibwé, déclarait en 1983, s'adressant à ses pairs : « Unissons nos pensées afin d'agir en harmonie. Nous devons toujours avoir

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

26, 27 et 28 novembre 2010

LE CORPS RÉPARÉ

Espace Robespierre | Ivry-sur-Seine

Entrée libre

Tables rondes, rencontres avec des auteurs,
librairie, expositions, animations, spectacles

www.ivry94.fr et www.asts.asso.fr/salondulivre-hst

Métro Mairie d'Ivry ou RER C gare Ivry-sur-Seine

6e salon du livre d'histoire des sciences et des techniques

asts le lien entre Science et Citoyens

IVRY S/SEINE

Vincent Brault

5. DE JEUNES INDIENS TEKO DE GUYANE rendent plus visibles des pétroglyphes des Amérindiens qui occupaient ce lieu il y a quelques siècles en les enduisant de glaise. Ces symboles humains et animaux évoquent des thèmes mythiques que les Indiens se transmettent encore aujourd'hui.

à l'esprit que ce que nous décidons ici affectera, pour toujours, nos enfants et nos petits-enfants […]. Nous ne devons pas nous précipiter même si c'est la survie des nations indiennes qui est menacée comme elle ne l'a jamais été. Nous ne devons pas prendre des décisions trop rapides que nous pourrions regretter plus tard. Agissons avec sagesse plutôt qu'avec hâte. »

Les sociétés traditionnelles savent aussi ménager des moments de détente qui peuvent être l'occasion d'une prière, d'une méditation solitaire, ou au contraire de se retrouver avec les siens et de partager. Le *pow wow* est l'une de ces circonstances qui introduisent une « béance dans la durée », selon l'expression du sociologue Jean Duvignaud, et ce n'est pas un hasard si ces réunions où le chant et la musique des tambours rythment les danses constituent, au sein des communautés rurales (les réserves) et urbaines, les premières et plus manifestes expressions d'une identité amérindienne en plein renouveau. Comme un certain humour est un autre trait caractéristique des cultures nord-amérindiennes, au cours d'un de ces *pow wows*, dans la réserve ojibwé de Saugeen au Canada, un annonceur précisa, en invitant les participants à se dépêcher de revêtir leurs costumes de danse, que le début du *pow wow* était fixé à 14 heures juste, « No Indian time ! ».

Plus que le manque éventuel de formation ou l'absence de qualification, les réticences à se plier à la contrainte horaire (et à toute autre forme de contrainte) contribuent sans doute à marginaliser les Amérindiens par rapport au « monde du travail ». Un patron qui embauche un Indien ne tolérera pas longtemps qu'il se présente sur son lieu de travail avec un retard systématique. Les Amérindiens préfèrent souvent les travaux saisonniers ou temporaires qui rapportent suffisamment pour vivre plusieurs mois.

Retour aux traditions

L'avenir des sociétés traditionnelles et des modèles qu'elles représentent dépend avant tout de leur volonté de les faire perdurer, mais aussi des possibilités objectives qui leur seront laissées de réaliser ce projet. Prises dans la logique de la croissance, les politiques officielles ne sont pas plus favorables aujourd'hui que naguère à un pluralisme culturel qui porte les germes de la contestation. Néanmoins, cette contestation – surtout depuis les années 1960 – s'exprime de plus en plus de l'intérieur.

Imitant leurs ancêtres amérindiens, un nombre croissant d'Occidentaux, poètes, artistes, intellectuels, hippies ou simples citoyens retournent aux sources et trouvent plaisir à méditer et à rêver au fond des forêts. Est-ce un hasard si l'objet d'artisanat le plus vendu dans les *pow wows* est l'« attrapeur de rêve » *(dream catcher)*, un petit cercle, autrefois accroché au berceau de l'enfant, dans lequel est tressé un réseau en forme de toile d'araignée qui retient les cauchemars et ne laisse passer que les bons rêves, ces rêves qui décomposent l'être hors de la durée et de l'espace ?

L'une des critiques les plus sévères que l'on puisse faire au système dominant n'est-elle pas que, dans le même temps où les progrès de la médecine permettent une plus grande durée de la vie objective, les contraintes de la civilisation moderne provoquent un raccourcissement drastique du temps vécu ?

BIBLIOGRAPHIE

É. Navet, **Des sociétés de rêve : natures, savoirs et savoir-vivre des sociétés chamaniques,** *Actes du 4e Congrès européen d'ethnopharmacologie*, pp. 120-139, 2002.

É. Navet, **La quête de la « Terre sans mal » chez les peuples traditionnels : l'exemple des Tupi-Guarani (Amérique du Sud),** *Le portique*, n° 10, pp. 111-132, 2002.

A. Bensa, **La mémoire des lieux chez les Kanak de Nouvelle-Calédonie,** *Ateliers*, vol. 17, pp. 83-89, 1997.

S. Poirier, **Les jardins du nomade, Cosmologie, territoire et personne dans le désert occidental australien,** LIT, 1996.

É. Navet, **Les sources mythiques de la fonction chamanique chez les Indiens Emerillon de Guyane française,** *Cahiers ethnologiques*, n° 14, pp. 49-77, 1992.

J. Highwater, **L'esprit de l'aube, Vision et réalité des Indiens d'Amérique,** L'Âge d'Homme, 1984.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

GÉREZ VOTRE BIBLIOGRAPHIE
EN UN CLIC AVEC LA NOUVELLE VERSION...

Licence À partir de* 187 € HT

Thomson Reuters
EndNote X4
Advance your Research and Publish Instantly

LA RÉFÉRENCE MONDIALE EN MATIÈRE DE GESTION BIBLIOGRAPHIQUE

3 900 FICHIERS DE CONNEXION, + DE 700 FILTRES D'IMPORTATION, + DE 4 500 STYLES DE REVUE

Pages'09 pour Macintosh
OpenOffice.org pour Windows
Word 2003, 2007 et 2010 (Windows)
Word 2004 et 2008 (Mac)

Des millions de chercheurs, d'auteurs, d'étudiants et de bibliothécaires utilisent EndNote pour interroger des bases de données bibliographiques en ligne, organiser leurs références, leurs images et leurs PDFs dans n'importe quelle langue, et créer ainsi leurs propres bibliographies et listes de figures en quelques clics.

THOMSON REUTERS

Retrouvez l'intégralité des nouveautés EndNote X4 sur :
www.ritme.com/go/endnote

(*) Tarif hors-taxe «Éducation», soit 223,65 € TTC, valable jusqu'au 15.12.2010, soumis à condition - Livraison par téléchargement

RITME INFORMATIQUE
34, Bd Haussmann - 75009 Paris
Tél. : 01 42 46 00 42 - Fax : 01 42 46 00 33 - www.ritme.com — info@ritme.com

RITME INFORMATIQUE

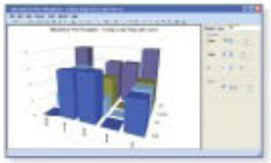
Licence À partir de* 423 € HT

NOUVELLE VERSION
DE LA RÉFÉRENCE MONDIALE
EN ANALYSE DE DONNÉES QUALITATIVE

NVIVO

VIDÉOS – ENREGISTREMENTS D'ENTRETIENS – DOCUMENTS – PHOTOS – CLIPS MÉDIA – MUSIQUE – PODCAST

Utilisé par de nombreux organismes universitaires, gouvernementaux et commerciaux, NVIVO 9 permet de télécharger et d'analyser des documents vidéo et audio, des images et du texte placés côte à côte. Le logiciel peut être utilisé pour tester des théories, déterminer des tendances et contre-vérifier l'information. Il est possible de créer des tableaux et des modèles professionnels et d'échanger des dossiers de projets NVIVO et des résultats par l'intermédiaire de mini sites web, même avec les personnes qui n'ont pas NVIVO.



QSR International

Retrouvez l'intégralité des nouveautés NVIVO sur :
www.ritme.com/go/nvivo

(*) Tarif hors-taxe «Éducation», soit 505,91 € TTC, valable jusqu'au 15.12.2010, soumis à condition - Livraison par téléchargement.

© Ritme Informatique 2010 - Contact : info@ritme.com - Tous droit réservés.

Plus d'informations :
www.ritme.com

Pour toutes commandes, merci d'indiquer la référence suivante : PLS1110

Plus d'informations :
info@ritme.com

Le temps double de l'Égypte ancienne

Jan Assmann

Pour les anciens Égyptiens, le temps n'était pas un flux s'écoulant en permanence en direction de l'avenir, mais l'union de deux aspects complémentaires : Djet, la durée éternelle, et Neheh, le temps cyclique.

À la fin du Ve siècle avant notre ère, Héraclite écrit : *À ceux qui descendent dans les mêmes fleuves surviennent toujours d'autres et d'autres eaux*. Que signifie cette métaphore ? Que demain, aujourd'hui sera déjà du passé. Que le temps naît du caractère passager de toute chose. Que, parce que tout phénomène semble avoir une cause passée, et que, parce que nous nous souvenons du passé et non du futur, nous divisons le temps en passé, présent et avenir. Cette trilogie est inscrite dans la structure de la plupart des langues indo-européennes. Elle nous paraît naturelle ; nous la croyons universelle.

L'est-elle vraiment ? Comme nous allons le voir, l'Égypte ancienne fournit un exemple de culture qui avait une tout autre notion du temps : une notion double alliant le passager et le durable.

À la trilogie passé-présent-avenir des cultures indo-européennes répond en effet, chez les anciens Égyptiens, la dualité de Djet et de Neheh. Ces termes ne désignent pas des phases résultant l'une de l'autre, mais des aspects qui doivent être joints pour décrire complètement le temps. Ces aspects se rapportent à tout processus temporel, qui peut être soit « accompli » (perfectif), soit « inaccompli » (imperfectif).

Djet correspond à l'aspect perfectif du temps, c'est-à-dire à l'indéfectible durée de ce qui est parfait. Quand le dieu de la Bible est ainsi loué : *Car mille ans sont à tes yeux, comme le jour qui est passé hier*[…], nous lisons dans deux hymnes égyptiens : *La Djet est devant tes yeux (Amon) comme le jour qui est passé hier.*

De son côté, Neheh correspond à l'aspect imperfectif du temps, au mouvement cyclique jamais achevé, au retour incessant des jours, mois, années et autres cycles plus longs, tel celui du décalage entre le calendrier égyptien et le calendrier solaire, qui ne s'annule que tous les 1 460 ans (période de Sothis).

La trilogie passé-présent-futur nous semble d'autant plus naturelle qu'elle est inscrite dans les temps de nos verbes. Toutefois, la dualité des aspects « évolution (déroulement) » et « perfection (achèvement) » est naturelle aussi. De fait, l'anglais compte parmi les rares langues indo-européennes qui comportent une structure verbale traduisant l'aspect imperfectif : la forme progressive de, par exemple, *I am coming*.

La valeur qu'accordaient les locuteurs des anciennes langues égyptiennes aux aspects perfectifs et imperfectifs était aussi inscrite dans leurs systèmes verbaux. Quand il leur fallait exprimer quelque chose au passé, au présent ou au futur, les anciens Égyptiens se servaient de paraphrases. Il existait ainsi un verbe signifiant « avoir fait quelque chose dans le passé ». Le futur s'exprimait à l'aide de la préposition « vers, en direction de » : « je viendrai » se disait ainsi « je suis en direction de venir ».

Pour saisir les concepts égyptiens, il est intéressant de prendre en compte l'étymologie des mots et surtout leur étymographie (l'origine de leur graphie). S'agissant de Neheh, cette approche est informative. La racine principale du mot est *hh* et caractérise des concepts tels que « chercher », « envahir » et « millions ». À première vue, ils n'ont pas grand-chose à voir entre eux et rien avec le temps, mais l'idée d'infini et d'imprévisible colle à chacun d'eux. De cette racine sont aussi issus les mots égyptiens *houh* et *haouhet*, qui désignent le chaos, l'interminable « pas encore temps ». La réplication dans ces mots du *h* et le préfixe *h-* (comme dans *h-aouet*) suggère un mouvement interne cyclique se répétant sans cesse.

Neheh s'écrivait en outre avec le soleil pour déterminatif. Les déterminatifs sont des signes sans valeur phonétique qui indiquent non pas une prononciation, mais l'appartenance à une classe de sens. Or le déterminatif « soleil » se retrouve sur presque tous les termes temporels de l'Égypte ancienne, tels « heure », « jour », « saison », « année », « demain », « hier » : il se rapporte à la classe sémantique du « temps », ou plus exactement au temps mobile Neheh. Et quel autre déterminatif que le soleil, qui se lève et se couche tous les jours, serait mieux à même d'exprimer cette nuance ?

Le dieu-soleil, associé à Neheh

Le temps cyclique se manifestait aux yeux des Égyptiens quotidiennement et partout, dans les fluctuations du niveau du Nil, dans les migrations saisonnières des oiseaux, dans le cycle de la naissance et de la vie, dans la maturation et le vieillissement des hommes, dans la course des étoiles, les phases croissantes et décroissantes de la Lune, les enterrements et les avènements des rois. Bref, tout ce qui entourait l'Égyptien ancien, ainsi que les rythmes biologiques marquant son existence, manifestaient le travail de Neheh.

1. LE CARACTÈRE PERMANENT de la pierre était pour les Égyptiens une manifestation du temps immuable, de ce qui dure éternellement, aspect qui s'opposait au temps fini des cycles. Aujourd'hui encore, les pyramides expriment fortement cette notion égyptienne de l'éternité : construites en pierre pour durer, elles semblent immuables.

L'ESSENTIEL

- **Dans l'Égypte ancienne, la notion de temps comportait deux aspects complémentaires : un aspect cyclique représenté par Neheh, et un aspect immuable représenté par Djet.**
- **Ces deux aspects du temps s'imposaient au cosmos et à tout ce qui existait.**
- **Pour un ancien Égyptien, le salut consistait à passer d'une existence inscrite dans les cycles temporels du monde supérieur à une existence inscrite dans le temps immuable du monde souterrain.**

©Shutterstock/Fatih Kocyigit

Spektrum der Wissenschaft

© Shutterstock/Jose Ignacio Soto

2. SUR LE COFFRE D'OR de Touthankamon, un détail *(ci-dessus)* montre les divinités Neheh *(à gauche)* et Djet *(à droite)*, la tête surmontée par leurs hiéroglyphes. Dans la mythologie des anciens Égyptiens, Neheh et Djet produisaient ensemble le temps et par là l'ordre du monde. Ce dernier supposait que Rê, le dieu-soleil, voyage chaque jour à travers le ciel à bord de sa barque sacrée *(papyrus à droite)* et chaque nuit à travers le monde souterrain. Chaque lever de soleil était donc une victoire remportée par Rê sur les « forces des ténèbres ».

Hymne d'une tombe à Thèbes

(XII^e siècle avant notre ère)

Soyez salués Neheh et Djet,
Qui avez fondé le ciel sur ses piliers,
Qui avez fait le ciel et l'avez fixé
à ses limites,
Et qui y avez mis la Ba's des dieux,

Pour que Rê y monte et y brille
en tant que lune,
Sur les bras de Houh et de Hauhet,
Sur les mains duquel se trouve Neheh,
Dans le poing duquel se trouve Djet.

Neheh arrive rajeuni,
Guidant le Nil depuis sa caverne,
Pour maintenir hommes et dieux en vie,
Qui matin après matin se lève tôt,
Pour enfanter des années
Dans l'éternité de l'éternité.
Thèbes continue parce qu'elle est fondée
Sur les bras de Neheh et de Djet.
Rê disparaît dans cela,
Ses neuf divinités réalisent la Ma'at
Et anéantissent l'injustice.
(Faites le sacrifice divin aux dieux
et le sacrifice des morts aux éclairés.)

Par opposition, le mot Djet recevait un tout autre déterminatif : il représentait la Terre et le sol, l'archétype de ce qui est solide et durable. Djet représentait donc un temps contenant l'accompli et le parfait.

Les deux notions se complétaient pour former un concept global de temps ou d'éternité, ce qui s'exprimait aussi dans les genres des deux mots : tandis que Neheh, le temps mouvementé, est masculin, Djet, le temps de la durée, est féminin.

Il y a 43 ans, lors de mon premier séjour à Thèbes, j'ai découvert dans deux tombes du XII^e siècle avant notre ère un hymne *(voir ci-contre)* qui montre clairement le rôle que jouent les deux aspects dans la cosmologie égyptienne.

Neheh et Djet, piliers du ciel

Neheh et Djet soulèvent le ciel haut au-dessus de la Terre, ce qui signifie que le temps a créé l'espace. Cela seulement rend possible le voyage de Rê, qui traverse le ciel sous la forme du Soleil et, chose intéressante dans cet hymne, également sous la forme de la Lune. C'est ainsi que sont apparus les jours, les mois, les saisons, les années, et que le temps est devenu mesurable. Le mot égyptien pour année signifie « ce qui se rajeunit », d'où le fait que le temps Neheh est rajeuni quand il lance une nouvelle année, dont le début était marqué par la crue du Nil. La séparation du ciel et de la Terre imposait aussi une distance entre les humains et les dieux. Cette distance obligeait à construire des temples, à créer des représentations des dieux, à développer des rites et à faire des sacrifices, afin de ne pas rompre le lien avec les dieux. D'où le rappel aux rites dans la dernière strophe de l'hymne. Par ailleurs, les aspects cosmiques de Djet se traduisaient aussi chez les hommes : des monuments de pierre en matérialisaient la durée immuable.

Cet hymne nous fait pénétrer dans la notion de temps des Égyptiens anciens, plus précisément dans leurs conceptions religieuses. Neheh, le temps cyclique, était le temps du dieu solaire. Ce temps était associé au devenir, dont le hiéroglyphe était un scarabée, symbole central de la théologie égyptienne. Ce n'était pas l'être, mais le devenir qui se trouvait au centre de la pensée. Neheh était de ce fait aussi le temps du culte.

Bien que le rite serve en premier lieu à la construction et à l'entretien du temps Neheh, chaque culte avait la forme d'un calendrier ritualisé. En Égypte, des spécialistes observaient le ciel, mais pas, comme en Mésopotamie, pour y découvrir des phénomènes singuliers interprétés comme des signes annonçant le futur, que l'on pouvait ainsi penser maîtriser ; cette attention au cosmos ne portait pas sur les exceptions, mais sur les phénomènes réguliers. C'est dans la régularité de processus cycliques que se manifestait à l'Égyptien le caractère divin du cosmos. Les calendriers solaire ou lunaire étaient avant tout des instruments servant à mettre le temps en ordre et à le maintenir en marche par le rite.

Un bel exemple de cette mentalité est le rituel des heures, une célébration de la course solaire pratiquée dans tous les temples égyptiens dédiés au Soleil. Il s'agissait par là de soutenir le combat ininterrompu de Rê contre Apopis, personnification du désordre, de l'évolution du monde vers l'immobilité et la désintégration, un combat auquel participaient tous les dieux. Sans cet effort pensait-on, le Soleil n'aurait pu avancer.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Autre exemple de cette mentalité : les Égyptiens utilisaient des calendriers de jours fastes et de jours néfastes (« hémérologies »), où chaque jour de l'année était relié à un événement mythique et recevait l'une des trois qualifications : favorable, neutre ou défavorable. Ces calendriers n'étaient cependant pas adaptés aux événements imprévus et uniques, donc à ce que nous décririons comme l'Histoire. Ne passait pour significatif et, pour cette raison, marqué de déterminatif, que ce qui se répétait. Ce qui en revanche sortait du cadre, et qui dans d'autres cultures serait passé pour un présage, n'avait aucune signification aux yeux des Égyptiens. Le temps calendaire n'était donc nullement un tonneau vide, dans lequel coulaient sans fin les événements, mais plutôt un programme débordant de sens, que l'on interprétait par des rites, afin d'éviter de précipiter les événements.

C'est aussi pourquoi on cherche – mais en vain – dans les textes égyptiens de grandes rétrospectives. Les scribes, qui n'y plaçaient que des événements, accordaient autant d'importance à la célébration d'une fête qu'à l'érection d'un bâtiment ou à une victoire sur l'ennemi. Tout s'écrivait sous la forme d'un calendrier, auquel le temps conférait un rythme et une continuité, calendrier qui maintenait un ordre et donnait un cadre au sein duquel on pouvait s'orienter et s'identifier.

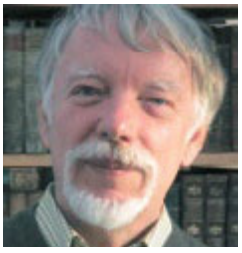
Une cosmologie connue sous le nom de *Livre de la déesse du ciel Nout* décrit le lever du soleil de la façon suivante : *Il* [le dieu solaire] *est apparu comme il est apparu la première fois dans la terre de la première fois*. C'est pourquoi la disparition de Rê derrière l'horizon à la fin de son cycle quotidien ne signifiait pas la fin du monde, mais son entrée dans la Terre dont il était sorti, et donc seulement l'accomplissement d'un cycle, qui ne pouvait que signifier le commencement prochain d'un nouveau cycle. Ce processus formait en quelque sorte l'histoire sacrée égyptienne, le dessein divin, le salut égyptien.

C'est pourquoi l'accomplissement des rites et la formation rituelle du temps étaient si essentiels : le monde humain était aussi censé se renouveler sans cesse dans ses déroulements étatiques, sociaux et personnels, afin de revenir à l'état idéal de la « première fois ». C'est dans le mystère du coucher et lever quotidiens du soleil que s'enracinaient toutes les espérances relatives à l'au-delà et à l'immortalité. En effet, grâce au temps cyclique, l'être humain pouvait espérer un renouvellement : le coucher du soleil et la fin de la vie se correspondaient. Dans la conception égyptienne, réussir signifiait donc non pas un progrès, mais un retour au début, à la première fois, aux modèles du passé, à la norme des ancêtres.

De Djet à l'empire des morts

Quant à Djet, le complément de Neheh, son sens culturel est clairement lié à l'érection de monuments en pierre. Aujourd'hui encore, le visiteur des pyramides ou des temples des morts sur la rive gauche du Nil, à Louxor, n'est pas sans ressentir, malgré l'agitation touristique qui l'entoure, une impression d'éternité. Avec Djet, nous quittons l'empire de Rê et entrons dans celui d'Osiris, dieu des morts, qui est lui-même un mort, et en tant que tel persiste à exister dans une perfection immuable. C'est ce qu'exprime son surnom Ounen-Néfer « celui qui existe dans la perfection ». Comme le temps Neheh était lié au dieu solaire et au devenir, le temps de Djet l'était à Osiris et à l'être.

L'AUTEUR



Jan ASSMANN a enseigné de 1976 à 2003 l'égyptologie à l'Université de Heidelberg, en Allemagne. Depuis 2005, il est professeur honoraire d'histoire de la culture et de la théorie religieuse à l'Université de Constance.

BIBLIOGRAPHIE

J. Assmann, **Das Doppelgesicht der Zeit il altägyptischen Denken, in Stein und Zeit**, *Mentsch und gesellschaft im Alten Ägypten*, pp. 32-58, Munich, 1991.

F. Servajean, **Djet et Neheh - Une histoire du temps égyptien**, Presses universitaires de la Méditerranée (Montpellier), 2007.

© Shutterstock/Jorge Sánchez Jorra

3. LES SOUVERAINS DE L'ANCIENNE ÉGYPTE construisaient de monumentales installations funéraires en vue de devenir partie du temps Djet, le temps de l'éternité. Ci-dessus, le temple funéraire de la reine-pharaon Hatchepsout (XV^e siècle avant notre ère).

© akg-images/Jean-Louis Nou

4. LE DIEU RÊ, ici symbolisé par une tête de bélier, au cours de son voyage dans le monde souterrain, se fond vers minuit avec Osiris, le souverain des morts. Les déesses Nephthys *(à gauche)* et Isis *(à droite)* le protègent.

© Hon Watts/Corbis

5. SEUL CELUI QUI, SA VIE DURANT, vit selon la Ma'at, l'ordre divin, pouvait espérer être admis dans le royaume d'Osiris. Cette admission était décidée par un tribunal des morts qui pesait le cœur du défunt en utilisant comme contrepoids une plume, symbole de puissance.

Le temps de Djet était aussi celui de la récompense morale et de la responsabilité. Il était fondé sur une structure morale, qui reposait sur la conviction que chaque être humain doit rendre des comptes pour ce qu'il a ou n'a pas fait. Le temps apparaît là comme un rapport entre action et conséquence, qui selon la conception égyptienne était garanti par la Ma'at, un concept ajoutant les notions de vérité, de justice et d'ordre. Les humains devaient réaliser la Ma'at par leur façon de diriger leurs vies, et cela en pensant les uns aux autres et en agissant les uns pour les autres.

La Ma'at était le concept central de l'éthique coopérative. Si chacun pense aux autres, par exemple en étant hospitalier, en respectant ses devoirs, en agissant pour les autres, alors le bien est récompensé, tandis que le mal est puni ; le rapport entre l'acte et ses conséquences est établi. Ce rapport n'est pas automatique comme une loi naturelle, mais il agit dans le cadre du souvenir et de l'attention, de nos pensées et actions pour les autres. L'existence d'un sens du monde était donc une question d'attention, et celle de l'absurdité du monde une affaire d'oubli. Nous pouvons donc parler de « temps du souvenir », s'agissant de la dimension morale du temps en Égypte ancienne.

Qui agissait de façon morale restait pour toujours dans le souvenir de la postérité. Seul le juste pouvait prétendre à l'immortalité. Les Égyptiens croyaient qu'après la mort, ils devraient rendre des comptes à Osiris et à un tribunal des morts pour la façon dont ils avaient mené leurs vies. Pendant qu'ils assuraient avoir vécu selon la Ma'at (selon la vérité, la justice et l'ordre) et ne pas avoir commis une longue liste de péchés, leur cœur était placé sur une balance *(voir la figure 5)*. Chaque mensonge le rendait plus lourd, et quand le plateau de la balance était trop lourd, un monstre l'avalait. Celui dont le cœur était sans péchés, Osiris le prenait en son empire, et par là dans le temps éternel.

Perfection et éternité n'étaient donc pas seulement une question de pierre et de monuments, mais aussi et surtout d'accomplissement moral. Pour durer dans l'espace du temps de Djet, trois choses étaient nécessaires : la « vertu », c'est-à-dire l'accomplissement moral, l'écriture, afin de pouvoir la rapporter, et un monument de pierre pour porter les inscriptions correspondantes, de façon à perpétuer le souvenir de la vertu. C'est pourquoi les

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

NEHEH ET DJET, SORTE DE YING ET DE YANG TEMPORELS

Imaginons que l'on ait demandé à un Égyptien des anciens temps la signification des termes Djet et Neheh. Il aurait probablement répondu : « Neheh, c'est le temps des êtres et des choses qui viennent au monde, qui se transforment, qui vieillissent et qui meurent ; ainsi, les plantes, les corps célestes, les nuages, la pluie, la crue du Nil, les être humains ; Djet, c'est le " temps " de ce qui est immuable, de ce qui ne se transforme jamais, de ce qui reste toujours identique à lui-même ; ainsi, la Terre, les dieux, le corps momifié des défunts, les sanctuaires des temples, etc. »

Ces deux notions ne sont pas indépendantes, car Neheh s'inscrit dans Djet, comme le masculin dans le féminin. La combinaison des deux n'est pas statique, mais dynamique, le temps s'extrayant régulièrement de l'immuabilité pour accompagner les êtres et les choses destinés à exister, puis à disparaître. Au terme de cette durée, et en vertu de son caractère cyclique, Neheh regagne Djet. Ainsi, par exemple, la végétation croît, puis s'étiole le temps d'un cycle Neheh sur une terre qui, elle, est Djet.

À l'origine, le monde n'était pas soumis au temps : il était Djet. Les hommes, qui vivaient en bonne entente avec les dieux, se révoltèrent. Pour les punir, le démiurge créa le ciel afin d'y abriter les manifestations célestes des dieux (leurs ba), étoiles et constellations. Par leur mouvement régulier dans le ciel, elles créèrent le nombre du temps et le temps lui-même. Ainsi, punition suprême, les hommes devinrent mortels.

Dans le monde des hommes, principalement soumis à Neheh, les lieux où les dieux se manifestèrent la première fois conservèrent leur caractère immuable (Djet). C'est là que furent construits, aux époques les plus reculées, les premiers enclos sacrés avec, à l'entrée, le mât signalant une présence divine. C'est là que, plus tard, se dressèrent les temples en pierre, matériau immuable par définition. C'est là enfin que Pharaon officie, qu'il communique avec les dieux, là où le temps rejoint l'immuabilité.

Frédéric Servajean

LES DEUX LIONS AKER soutiennent le signe de l'horizon d'où surgit le disque solaire, à l'intérieur duquel se trouve le faucon solaire Rê-Horakhty, qui produit le temps Neheh par ses cycles quotidiens.

La nature temporelle de Pharaon est également duelle. En effet, lorsque les dieux créèrent le monde, ils conçurent la fonction royale de manière immuable. Car pour les dieux et les hommes, un monde sans roi est inconcevable. Revêtu de la fonction royale, le nouveau pharaon est immergé dans l'immuabilité, mais reste mortel en tant qu'humain. Le temps Neheh est donc à nouveau déterminé par l'immuabilité Djet, la durée de vie du roi par l'immuabilité de la fonction. Quand le cycle vital de Pharaon parvient à son terme et qu'il est conduit dans sa dernière demeure, le décompte des années est ramené à zéro, et un nouveau cycle commence.

Frédéric Servajean,
Institut d'Égyptologie
François Daumas

tombeaux monumentaux des Égyptiens ne sont pas seulement un moyen de se souvenir, mais aussi une institution morale.

Toutefois, le caractère particulier de la construction égyptienne du temps ne tenait pas tant à la différenciation de ses deux dimensions qu'à la façon dont elles étaient liées : c'est ensemble que Neheh et Djet formaient le temps. Beaucoup de représentations du dieu solaire le montrent en train de traverser le ciel pendant le jour et en train d'éclairer Osiris dans le monde souterrain pendant la nuit. Cette union nocturne de Rê et d'Osiris correspond au lien entre Neheh et Djet.

Dans la tombe de la reine Néfertari (la principale épouse de Ramsès II, vers le XIIIe siècle avant notre ère) se trouve la représentation d'une momie à tête de bélier, un disque solaire sur la tête, qui est par ailleurs flanquée et protégée par les déesses Isis et Nephthys *(voir la figure 4)*. Les inscriptions placées sur les côtés expliquent : « Voici Rê, qui repose en Osiris, voici Osiris, qui repose en Rê. » Dans la mythologie égyptienne, c'est à minuit que les représentants du temps cosmique, éternellement cyclique, entraient en contact avec la perfection immuable. La tête de bélier se rapporte à la forme prise par le dieu solaire la nuit et la momie à Osiris. Les déesses Isis et Nephthys se rapportent aussi à Osiris qu'elles protègent.

Neheh le jour, Djet la nuit

Le temps se trouve aussi être représenté au XVIIe chapitre du *Livre des morts*. Deux lions tournés vers l'extérieur flanquent le hiéroglyphe du mot Achet, qui désigne un endroit entre deux montagnes où le Soleil apparaît et disparaît (représentation difficile à comprendre, puisque les horizons Est et Ouest y sont fusionnés). À côté du lion gauche se trouve l'inscription « le jour de demain », tandis que l'inscription « le jour d'hier » est à côté du lion droit. On lit dans le texte situé sous la représentation :

Je suis le hier, je connais le demain.
Que signifie cela ?
En ce qui concerne le hier : c'est Osiris.
En ce qui concerne le demain : c'est Rê.

Dans le même texte figure aussi :

Quant à Neheh, c'est le jour.
Quant à Djet, c'est la nuit.

Les deux lions, qui flanquent le lever de soleil et qui représentent aussi demain et hier, ou le jour et la nuit, et symbolisent donc Neheh et Djet, représentent aussi l'unité du temps, qui rassemble ces deux aspects.

En plus du cosmos, l'être humain existait dans les deux aspects aussi. En construisant des monuments, les humains aspiraient au temps Djet, et, au cours des rites, dont le déroulement immuable représentait le retour éternel des cycles cosmiques dans les actions humaines, ils s'appropriaient une partie de Neheh. C'est pourquoi, pendant le rituel de l'embaumement, le prêtre prononçait les mots évoquant le *Ba*, sorte de composante mobile de l'être humain qui le quittait et lui revenait régulièrement :

Que ton Ba existe, en ce qu'il vive dans Neheh,
Comme Orion dans le corps de la déesse du ciel ;
En ce que ton cadavre dure dans Djet
Comme la pierre de la montagne.

Ainsi, après sa mort, un Égyptien désirait se fondre dans le temps cosmique en ses deux aspects : le temps du ciel, cyclique, et celui de la Terre, immuable.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

HISTOIRE DES SCIENCES

La mission jésuite en Chine : tempêtes, science et politique

Au XVI^e siècle, le jésuite italien Matteo Ricci et 13 confrères embarquaient pour la Chine. S'ils ne convertirent pas les Chinois au christianisme, ils leur transmirent de nombreux savoirs occidentaux en astronomie, mathématiques et géographie.

Isaïa IANNACCONE

Le 23 mars 1578, une procession parcourt les rues de Lisbonne : elle accompagne 14 missionnaires jésuites au port, près de la tour de Belém. Parmi eux, l'Italien Matteo Ricci, mort il y a tout juste 400 ans. À l'aube du jour suivant, trois imposants navires descendent le Tage pour gagner l'Océan et faire voile jusqu'en Inde, qu'ils atteindront le 13 septembre à Goa, enclave portugaise, après avoir contourné l'Afrique. C'est le début d'un périple qui s'achèvera le 7 août 1582 à Macao, important comptoir commercial au Sud de la Chine dont les Chinois ont partiellement confié la gestion aux Portugais.

Bravant les terribles conditions des voyages en mer de l'époque, les 14 missionnaires de la Compagnie de Jésus ont embarqué. Leur objectif : propager et imposer leur foi aux « païens » de l'Empire du milieu. Dans leurs malles s'entassent aussi livres et objets de science. Bien leur en a pris, car les Chinois seront hermétiques au discours missionnaire, et le défi de Matteo Ricci et de ses confrères se jouera sur le fil de la science.

À cette époque, qu'ils soient Français, Italiens, Espagnols, Portugais, les jésuites ont pour vocation d'évangéliser des peuples. Ils sont d'abord éduqués dans les prestigieux collèges de leur ordre religieux, pourvoyeurs pendant deux siècles de l'élite des savants – dont le mathématicien Marin Mersenne (1588-1648), René Descartes (1596-1650) et Voltaire (1694-1778) –, ainsi que la plupart des nobles appartenant à la classe dirigeante de l'Europe des Lumières. Nombre d'intendants régionaux de France ont notamment été préparés dans ces collèges. Cinq années sont consacrées aux études grammaticales et littéraires, puis trois années aux sciences – mathématiques, géométrie, physique, géographie, astronomie –, à la philosophie et à la théologie.

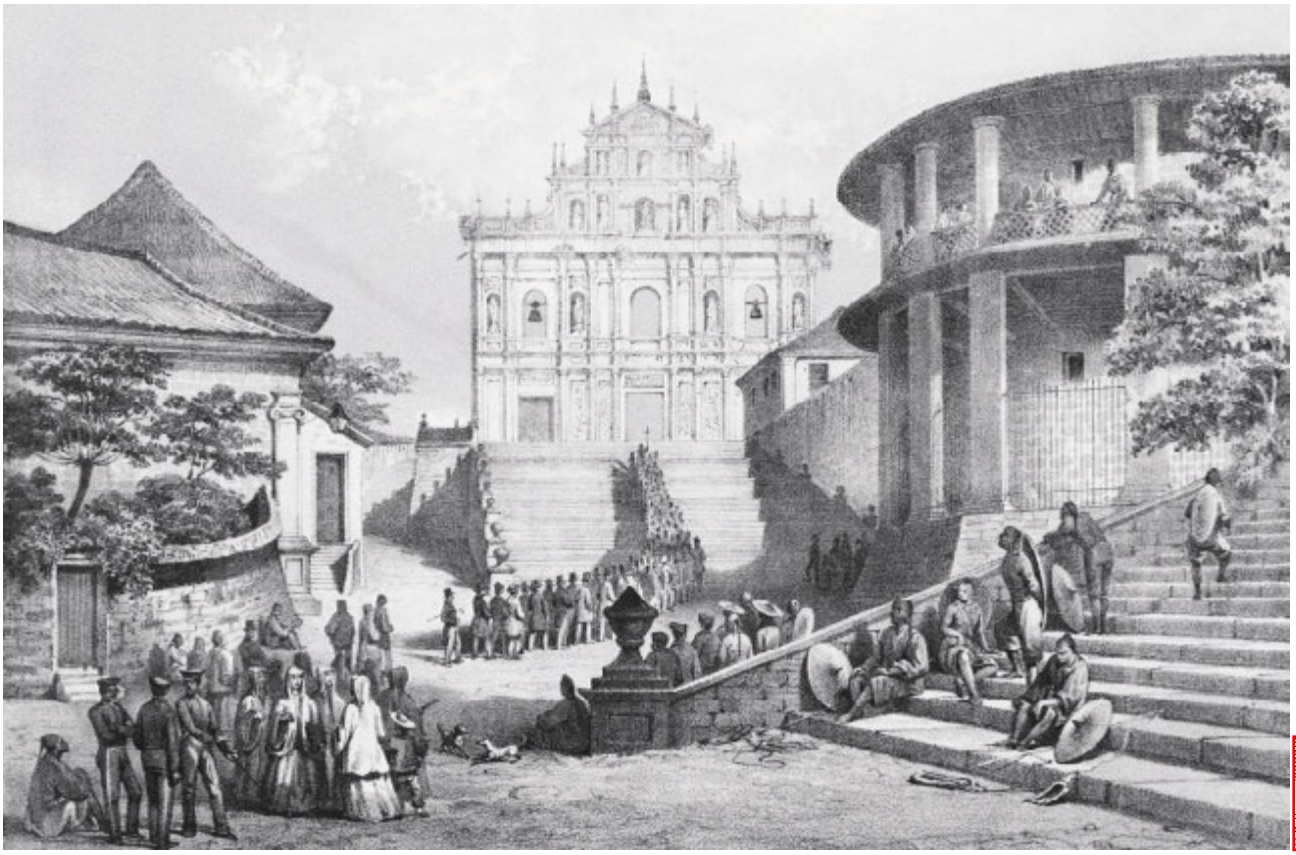
Un voyage épouvantable

Après leurs études, s'appuyant souvent sur l'armée coloniale en place, les missionnaires partent convertir les peuples non chrétiens aux quatre coins du monde – Amériques, Inde, Japon. La Chine est la prochaine destination. Toutefois, aucune armée ne les y soutiendra cette fois : les Chinois veillent à ce que les Portugais ne s'aventurent pas sur le territoire au-delà de la presqu'île de Macao ; Matteo Ricci et ses confrères seront seuls, avec pour seules armes leurs convictions et leur savoir.

Leur premier défi est la traversée des océans, tant à l'époque il est courant de périr durant le voyage. Les trois navires sur lesquels ils sont répartis – le *Saint Louis*, le *Saint Grégoire* et le *Bon Jésus* – sont des caraques, de solides bateaux construits en bois de teck indien à Goa ou à Cochin, en Inde, et équipés de canons (20 à 28 bouches de feu). Chaque équipage compte presque 120 hommes. À bord du *Saint Louis*, Matteo Ricci est inscrit sur la liste des passagers comme *romani philosophus* (philosophe romain). Les bateaux sont si lents qu'une lettre que le jésuite enverra de la Chine à son supérieur à Rome mettra 17 ans pour arriver en Europe ! Aussi écrit-il prudemment à son vieux père : « Je ne sais pas si ma lettre vous trouvera sur la terre ou au ciel… »

LE JÉSUITE ITALIEN Matteo Ricci (1552-1610), fondateur de la mission jésuite en Chine, est célébré chaque année en Chine pour avoir amorcé les échanges culturels et savants entre Orient et Occident. Cette statue a été érigée à Pékin en son honneur. À partir de 1582, Ricci se consacra à ces échanges. Il s'éteignit à Pékin, où il fut enterré avec l'approbation de l'empereur.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010


© Bettmann/CORBIS

Si les caraques sont si lentes, c'est parce qu'elles sont lourdes : les nombreuses marchandises qu'elles transportent s'y entassent un peu partout. Souvent, les passagers doivent céder leurs cabines aux marchands, qui y entreposent leurs produits, et dormir sur le pont. L'entassement désordonné des personnes et des biens rend les navires instables et la navigation périlleuse.

Qu'allaient-ils faire dans cette galère ?

Mais ce n'est là que le moindre des dangers. Bien d'autres sont au rendez-vous : typhons, fréquents sur les mers orientales ; rochers et hauts-fonds marins que les approximatifs portulans – les cartes nautiques de l'époque – ne mentionnent pas ; vagues gigantesques en plein océan ; vents imprévisibles (on part de Lisbonne en mars et de Goa à Noël en comptant sur les moussons qui soufflent une partie de l'année vers l'Est, l'autre partie vers l'Ouest). Le tout avec une instrumentation et des données géographiques peu fiables : la boussole devient folle au cap de Bonne-Espérance et la longitude est calculée grossièrement à partir de la distance *présumée* du navire au port qu'il a quitté…

Et que dire des dangers humains ? Souvent recrutés de force parmi des paysans, des pauvres gens, des prisonniers et des ivrognes, les marins sont inexpérimentés. De leur côté, les officiers sont embauchés en tant que nobles et non comme experts en navigation. Sans compter que les épouses et les filles des officiers excitent les matelots malgré les prostituées invitées à bord. Enfin, il faut aussi faire avec les clandestins se cachant pour échapper à de sombres affaires…

Dans ce paysage peu engageant, les jésuites organisent des messes et des processions à bord des navires et confisquent les dés à jouer ainsi que les livres licencieux des marins. Mais cela ne suffit pas à conjurer les maladies, les pirates et les naufrages : on meurt de la typhoïde, du scorbut, de malnutrition, de la nourriture avariée, de l'eau polluée et même d'insolation. Pirates et corsaires, surtout anglais et hollandais, sillonnent l'Océan à la poursuite des concurrents de leurs gouvernements sur les marchés d'Asie ou à la recherche d'un butin.

Ainsi, seule l'obsession de gagner beaucoup d'argent (c'est le cas des marchands), ou celle de convertir de nombreuses âmes au christianisme (c'est le cas des missionnaires), pouvait justifier un tel voyage…

Matteo Ricci et ses compagnons ne sont pas les premiers jésuites à s'installer à

LA FAÇADE DE L'ÉGLISE SAINT PAUL du couvent jésuite de Macao, gravure du peintre allemand Wilhelm Heine (1854). Important comptoir commercial, cette presqu'île chinoise était en partie gérée par les Portugais depuis une vingtaine d'années lorsque la mission jésuite de Matteo Ricci débarqua, en 1582.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

L'AUTEUR

Spécialiste de l'histoire des sciences et des techniques en Chine, Isaïa IANNACCONE est professeur à Bruxelles et chercheur associé auprès de l'Observatoire de Paris.

Macao. Dès les années 1540, la Compagnie de Jésus avait envoyé des hommes en Extrême-Orient – en Inde et au Japon –, où le Portugal et l'Espagne avaient pris le contrôle de quelques territoires et, dès 1557, plusieurs missionnaires s'étaient succédé à Macao. Toutefois, aucun n'avait pu franchir durablement les portes de l'enclave portugaise et installer une mission en Chine, les Chinois restant méfiants envers ces étrangers. Confrontés au supplice du Christ, ils redoutaient d'adorer un homme blessé, agonisant sur la croix, qui selon eux portait malchance. Cela d'autant plus qu'ils n'appréciaient pas les hommes qui, à l'instar de Jésus, des bonzes bouddhistes ou des prêtres étrangers, n'avaient pas d'enfant et, par conséquent, manquaient d'héritiers pour assurer le seul culte pratiqués par tous les Chinois, celui des ancêtres. La méfiance envers les « barbares » était de toute façon de mise.

Amadouer les Chinois par la science

Tirant enseignement de l'échec de ses prédécesseurs, Matteo Ricci met au point une stratégie de pénétration du catholicisme. Le prêtre italien est un homme dogmatique et plein de préjugés : pour lui, les Chinois sont des « païens qui adorent des idoles », des ignorants qui pensent que le ciel est « vide et infini ». Il a néanmoins compris qu'il s'agit d'un peuple de longue tradition lettrée et qu'un dialogue devrait être possible sur ce terrain.

Les missionnaires apprennent donc le chinois et se familiarisent avec les coutumes locales. En outre, pour montrer leur volonté d'intégration et d'échange culturel, ils troquent leur robe contre la tenue vestimentaire des lettrés, les dépositaires de la culture chinoise, qui occupent des postes stratégiques auprès de l'Empereur. Ayant noté que l'Empereur de Chine est le Fils du Ciel et, qu'à ce titre, il se doit de connaître le ciel et tous ses phénomènes, les jésuites s'engagent sur le terrain de l'astronomie.

À l'époque, les Chinois n'arrivent pas à dresser un calendrier correct : fondés sur des mesures du temps à l'aide de divers instruments, tel le gnomon (cadran solaire), leurs calculs s'appuient sur des constantes astronomiques ajustées d'année en année et une origine provisoire du temps, elle aussi susceptible d'être révisée. Aussi, au lieu de l'Évangile, les jésuites présentent aux Chinois les livres d'Euclide ; à la place de la croix, ils leur montrent la lunette astronomique ; en guise de règles du catéchisme, ils leur donnent des méthodes pour dresser les cartes géographiques et les initient aux calculs astronomiques indispensables pour prévoir les mouvements des astres. Le plus frappant est qu'en agissant ainsi, les missionnaires ont apporté aux Chinois une

Bagages et nourriture

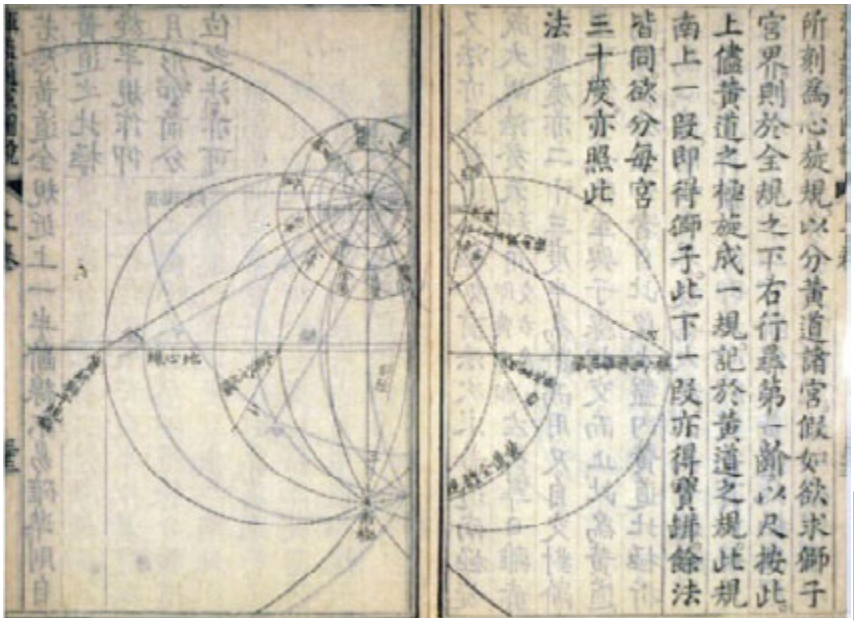
« Les bagages des missionnaires étaient entassés au fond de la cale, entre la carlingue et le premier pont. Comme ils renfermaient pour la plupart des livres, on les avait recouverts de sciure, de manière que les vers ne les attaquent pas. Pour la même raison, on avait enveloppé les caisses d'instruments – des sphères armillaires, des pendules, des sextants, des quadrants et la lunette astronomique – dans des couvertures de crins de cheval goudronnées. Non loin de là, des tonneaux et des barils contenant de la viande de bœuf et de porc en saumure, du poisson salé, des galettes et de la farine également salées pour décourager souris et insectes. Ail, oignons, petits pois, haricots verts, pois chiches, patates douces, cassave et fruits secs complétaient le garde-manger. Il y avait aussi de l'eau potable qui ne tarderait pas à devenir putride, raison pour laquelle on avait installé sur le pont de grands réservoirs en bois afin d'y recueillir la pluie, suivant l'usage des navires arabes qui sillonnaient l'océan Indien. Dans un coin de la cale, des centaines de poules, terrifiées par l'humidité et l'obscurité, le clapotis de l'eau qui filait sous leurs pattes, le grincement des cordes et les cris des rats, vivaient dans un état d'anxiété que les attentions de trois coqs noirs ne parvenaient pas à adoucir. Elles dégageaient une puanteur épouvantable. »

Isaïa Iannaccone,
L'ami de Galilée, 2006

Naufrage du grand galion portugais Sao Joao, en 1552, sur les côtes de l'Afrique de Sud.

B. Gomes de Brito, *Historia tragico-maritima*, 1735

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



Bibliothèque du Vatican

UNE PAGE DU *HUN GAI TONG XIAN TU SHUO* (Astrolabe et sphère avec illustrations et commentaires) du savant chinois Li Zhizao (1607). Cet ouvrage fondé sur l'*Astrolabium* (1593) du jésuite Christophorus Clavius, professeur de mathématiques de Ricci à Rome, est probablement préfacé par Ricci, dont Li Zhizao avait écouté et assimilé les doctrines astronomiques.

vision astronomique erronée – le système géocentrique du Grec Claude Ptolémée (IIe siècle), en vigueur à l'époque en Occident, dans lequel la course des astres autour de la Terre est calculée à l'aide de cercles emboîtés – alors qu'eux-mêmes, tout en ignorant la trigonométrie sphérique, ont connu les concepts de vide et d'infini bien avant le début de l'ère chrétienne.

Une collaboration fructueuse de l'Orient et de l'Occident

Grâce à cette approche diplomatique, Matteo Ricci a résolu la question de l'acceptation de religieux étrangers par les autochtones. La religion, quant à elle, est passée au second plan. Pendant près de deux siècles, la liste des savants jésuites qui se sont succédé à la cour des Ming, puis à celle des Qing, est longue. Parmi eux, citons les Allemands Johann Adam Schall von Bell – premier de dix missionnaires à diriger l'Observatoire astronomique impérial – et Johann Schreck, ami de Galilée ; les Italiens Giacomo Rho, Giulio Aleni, Martino Martini, Giuseppe Castiglione ; le Polonais Michel Boym ; les Belges Nicolas Trigault et Ferdinand Verbiest ; les Français Antoine Gaubil et Joseph-Marie Amiot.

Bien sûr, la rencontre entre la science européenne et la science chinoise n'aurait pu se faire sans la collaboration de savants chinois ouverts et cultivés, tels Xu Guangqi et Li Zhizao. Avec leur aide, des connaissances mathématiques, géométriques, astronomiques, géographiques, architecturales, musicales et picturales européennes ont été transmises aux Chinois dans leur propre langue – tels les *Éléments* d'Euclide, traduits par Matteo Ricci, et les principes de la cartographie occidentale. L'Europe elle-même a eu la possibilité de connaître la Chine grâce aux récits des missionnaires et à leurs rapports de mission.

C'est ainsi, par exemple, que Matteo Ricci a été le premier à se rendre compte, en dressant trois cartes géographiques modernes (avec méridiens et parallèles) reliant l'Occident à l'Extrême-Orient, que le Cathay atteint par Marco Polo lors de son périple était la Chine. Quand on pense que le débat acharné entre les philosophes français de l'époque des Lumières sur le caractère despotique ou, au contraire, idéal de la société chinoise fut un ferment culturel autour duquel s'élabora la pensée politique de l'Europe moderne, on ne peut que regretter que les livres d'histoire accordent si peu de place à la rencontre de l'Europe et de la Chine.

À VISITER

Jusqu'au 6 février 2011, le Palais de la découverte accueille une exposition consacrée à Matteo Ricci, conçue par l'Institut Ricci en association avec le Centre d'études sur la Chine moderne et contemporaine (EHESS/CNRS). www.palais-decouverte.fr

BIBLIOGRAPHIE

M. Masson (éd.), **Matteo Ricci un jésuite en Chine. Les savoirs en partage au XVIIe siècle**, Éditions facultés jésuites de Paris, 2010.

I. Iannaccone, **Le rideau de jade** [roman historique], Stock, 2008.

I. Iannaccone, **L'ami de Galilée** [roman historique], Stock, 2006.

I. Iannaccone, **Johann Schreck Terrentius**, Istituto Universitario Orientale, 1998.

I. Iannaccone, **Le fasi della divulgazione della scienza europea nella Cina del XVII secolo**, dans **La missione cattolica in Cina tra i secoli XVII-XVIII. Emiliano Palladini (1733-1793)**, Istituto Universitario Orientale, pp. 59-76, 1995.

P. D'Elia, **Storia dell'introduzione del cristianesimo in Cina**, Libreria dello stato, 1947-1949.

P. Tacchi Venturi, **Opere Storiche del P. Matteo Ricci S.I.**, Macerata, 1913.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

LOGIQUE & CALCUL

L'ensemble de tous les ensembles

L'ensemble de tous les ensembles est généralement considéré comme un concept contradictoire. Il s'agit là d'une erreur, parmi les plus répandues au sujet des ensembles, que les logiciens dénoncent.

Jean-Paul DELAHAYE

En histoire des sciences, on a souvent du mal à comprendre comment les solutions aujourd'hui adoptées ont été si difficiles à trouver et à mettre au point, tant les consensus élaborés par nos illustres prédécesseurs nous semblent parfois faciles. C'est le cas pour la théorie des ensembles, dont on n'imagine plus se passer et dont la naissance fut pourtant un douloureux moment de l'histoire des mathématiques. Au début du XX^{e} siècle, on pensa à y renoncer à cause des paradoxes qu'on y avait décelés. Lorsqu'une solution fut trouvée, celle qu'on nomme aujourd'hui ZFC, l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix, la communauté mathématique fut rassurée ; depuis bientôt un siècle, la théorie ZFC, qui sert de support à pratiquement tout ce qui se fait en mathématiques, est universellement perçue comme simple et naturelle.

Pour éviter les paradoxes, ZFC impose quelques contraintes qui sont devenues des vérités mathématiques absolues : il n'y a pas d'ensemble de tous les ensembles, un ensemble ne peut pas être élément de lui-même, il n'y a pas d'ensemble de tous les ordinaux, ni d'ensemble de tous les cardinaux, etc. Or ces affirmations catégoriques sont inutiles et trompeuses ! En effet, des théories alternatives des ensembles nous autorisent à traiter, sans rencontrer de paradoxe, de l'ensemble de tous les ensembles, d'ensembles qui sont éléments d'eux-mêmes, etc. Méfions-nous des vérités définitives que l'habitude et la paresse nous font adopter et qui ne sont que des conventions liées au choix d'une solution particulière favorisée par l'histoire.

Les paradoxes ensemblistes

Alors que la théorie des ensembles entrevue par le mathématicien Bernard Bolzano au début du XIX^{e} siècle et développée par Georg Cantor à partir de 1873 commençait à s'imposer comme la théorie de base des mathématiques, le logicien et philosophe anglais Bertrand Russell publia en 1903 ce que l'on dénomme aujourd'hui l'antinomie de Russell *(voir la figure 2)* et qui est une contradiction en plein cœur de la théo-

1. L'ensemble de tous les ensembles

Le fondateur de la théorie des ensembles, Georg Cantor *(ci-contre)* démontra (ce qui était vrai à l'époque, les axiomes fondateurs étant mal précisés) que l'on ne peut envisager l'ensemble de tous les ensembles. Il prouva en effet que l'ensemble $\mathcal{P}(E)$ des parties d'un ensemble E, fini ou infini, est toujours « plus gros » que cet ensemble. Ainsi, l'ensemble de tous les ensembles n'est pas l'ensemble le plus gros.

Cela ne signifie pas seulement que l'ensemble des parties « paraît » avoir plus d'éléments. Ainsi, l'ensemble infini des nombres entiers paraît plus gros que l'ensemble infini des nombres pairs, alors qu'il existe une bijection entre les entiers et les entiers pairs, obtenue en doublant chaque entier. On dit que ces deux ensembles ont la même taille (même cardinal).

On démontre facilement que l'ensemble des parties d'un ensemble fini à K éléments a 2^K parties. Ce résultat a été généralisé par Cantor à des ensembles infinis : l'ensemble des parties d'un ensemble (fini ou non) a une cardinalité strictement supérieure à celle de l'ensemble de départ. Il n'y a donc pas de plus grand cardinal qui serait celui de l'ensemble de tous les ensembles.

Tout ensemble qui peut-être mis en bijection avec l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels est dit dénombrable. Le théorème de Cantor montre en particulier que $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ n'est pas dénombrable et l'on ne peut « numéroter » de façon exhaustive les sous-ensembles de $\mathbb{N}$.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

rie de Cantor. Le raisonnement est le même que celui fait à propos du barbier qui ne rase que tous les habitants de sa ville qui ne se rasent pas eux-mêmes. S'il se rase lui-même, alors c'est qu'il ne se rase pas ; s'il ne se rase pas lui-même, alors il possède la propriété qui fait qu'il doit se raser, et donc il se rase lui-même.

Le choc produit par l'antinomie de Russell fut très grave. Il ébranla par exemple l'Allemand Richard Dedekind qui cessa un moment de publier ses travaux sur la théorie des nombres. Le philosophe allemand Gottlob Frege prit connaissance de l'antinomie de Russell en mettant la dernière main à son ouvrage sur les fondements de l'arithmétique. Il y ajouta une note exprimant son désarroi : « Un scientifique peut difficilement être confronté à une situation plus désagréable que celle de voir les bases de son travail disparaître au moment précis où il s'achève. J'ai été mis dans cette situation par une lettre de Bertrand Russell alors que le livre était pratiquement sous presse. »

Plusieurs mathématiciens considérèrent qu'il fallait abandonner la théorie des ensembles. En fait, la raison de l'inquiétude ne venait pas seulement du paradoxe de Russell, mais d'une série d'autres. Le premier paradoxe découvert en théorie des ensembles est en réalité celui de Cesare Burali-Forti paru en 1897. Il envisage l'ensemble de tous les ordinaux (un ordinal est un ensemble ordonné tel que toute partie possède un plus petit élément). Cet ensemble, s'il existe, définit un nouvel ordinal dont on montre qu'il est strictement plus grand que tous les ordinaux utilisés pour le définir, ce qui est absurde. L'ensemble de tous les cardinaux (nombres qui servent à mesurer la taille, finie ou infinie, des ensembles) est sujet à la même difficulté.

Ces paradoxes techniques gênent le mathématicien, mais le paradoxe le plus grave est sans doute le paradoxe de l'ensemble de tous les ensembles *(voir la figure 1)* que Cantor connaissait sans doute dès 1899. Il se déduit d'un théorème général démontré par Cantor qui indique que l'ensemble $\mathcal{P}(E)$ des parties d'un ensemble E est toujours plus gros que l'ensemble E lui-même. Il existe ainsi un ensemble de « puissance » supérieure à celle de tout ensemble E donné : c'est l'ensemble des sous-ensembles de E. Appliqué à l'ensemble de tous les ensembles, le théorème de Cantor conduit à l'idée que celui-ci, puisqu'il contient toutes ses parties, est strictement plus gros que lui-même, ce qui est aussi absurde que $1 > 1$.

Retomber sur ses pieds, c'est-à-dire éliminer les paradoxes, nécessite de les analyser et de modifier la façon dont nous raisonnons, de façon à ce qu'ils ne puissent plus survenir.

La résolution des paradoxes ensemblistes donna lieu à de nombreux travaux, dont ceux de Russell lui-même, qui constituent ce qu'on nomme la théorie des types et sur laquelle nous reviendrons.

La solution qui est adoptée aujourd'hui par les mathématiciens, ZFC, provient d'une axiomatisation de la théorie des ensembles proposée par Ernst Zermelo en 1908 et complétée dans les années 1920 par Abraham Fraenkel et John von Neumann. L'idée de cette solution est que seuls certains regroupements d'objets doivent être acceptés comme ensembles, mais pas tous. Il ne suffit pas de disposer d'une propriété, par exemple « l'ensemble *x* n'est pas élément de lui-même » pour avoir le droit de parler de l'ensemble des objets vérifiant la propriété, il faut être plus restrictif.

La théorie classique des ensembles : ZFC

La théorie ZFC soutient donc que certains regroupements définis par une propriété sont trop gros, et que seuls les regroupements soigneusement et progressivement construits comme nous l'expliquons plus loin sont des ensembles. La méthode se dénomme théorie de la limitation de taille.

Examinons les axiomes de ZFC pour voir comment s'effectue l'élimination des paradoxes. Le premier axiome indique, conformément au bon sens, que deux ensembles sont identiques si et seulement s'ils ont les mêmes éléments : un ensemble est

2. Les ensembles qui ne sont pas éléments d'eux-mêmes

L'antinomie de Bertrand Russell *(photographie à droite)* fut un tel choc qu'elle conduisit certains logiciens et mathématiciens, tel Dedekind, à abandonner temporairement la théorie des ensembles.

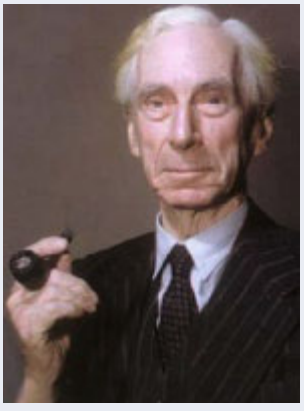
Russell distingue deux types d'ensembles, les ensembles qui sont un élément d'eux-mêmes (comme l'ensemble des idées, qui est une idée) et les ensembles qui ne sont pas éléments d'eux-mêmes (comme l'ensemble des éléphants, qui n'est pas un éléphant).

Le paradoxe consiste à raisonner de la manière suivante. Considérons l'ensemble E des ensembles qui ne sont pas élément d'eux-mêmes. Deux cas sont à envisager : E est élément de lui-même ou ne l'est pas.

– Si E n'est pas élément de lui-même, alors il possède la propriété caractéristique des éléments de E et il est donc dans E. Mais alors, E est élément de lui-même. C'est une contradiction !

– Si E est élément de lui-même, alors il n'a pas la propriété caractéristique des éléments de E (ne pas être élément d'eux-mêmes), ce qui implique que E ne peut pas être élément de lui-même. C'est, à nouveau, une contradiction.

Le catalogue de tous les catalogues qui ne se mentionnent pas eux-mêmes conduit pareillement à une contradiction. S'il se mentionne lui-même, il n'est pas dans ce catalogue, mais s'il n'est pas dans le catalogue, alors c'est un catalogue qui ne se mentionne pas lui-même et il devrait y être.



© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

3. Les axiomes de fondation et d'antifondation

L'axiome de fondation de ZFC indique que partant d'un ensemble (une boîte), si l'on prend l'un de ses éléments (une boîte-ensemble dans la boîte) et qu'on prend un élément dedans, et qu'on prend encore un élément dedans, etc., alors nécessairement on est obligé de s'arrêter : il n'existe pas de chaînes infinies descendantes x_0, x_1, x_2, x_3, x_4,... avec $x_1 \in x_0$, $x_2 \in x_1$, $x_3 \in x_2$, $x_4 \in x_3$,...

Cet axiome correspond à l'idée que lorsqu'on passe des êtres vivants aux cellules, des cellules aux molécules, des molécules aux atomes, des atomes aux quarks etc., on finit nécessairement par arriver à un ultime niveau qui n'est plus décomposable. L'axiome interdit aussi qu'un ensemble puisse se retrouver à l'intérieur de lui-même : $x \in x$ et interdit donc l'ensemble de tous les ensembles qui aurait cette propriété.

Le monde de la théorie classique des ensembles ZFC de Zermelo-Fraenkel correspond donc à une vue hiérarchisée du monde qui est facile à appréhender. C'est ce côté hiérarchisé et rassurant que la théorie des hyperensembles propose d'abandonner.

L'axiome d'antifondation qui définit la théorie des hyperensembles exprime que tout système d'équations, fini ou infini, de la forme : $x = \{1, \{7, 8\}, y, z\}$; $y = \{2, x, z\}$; $z = \{5\}$ (à gauche des variables représentant des ensembles, à droite des expressions utilisant les mêmes variables-ensembles) possède une solution unique : un hyperensemble.

L'équation $x = \{x\}$ définit l'hyperensemble le plus simple. Il est noté Ω et contient un élément : lui-même. C'est une sorte de bouteille de Klein. L'hyperensemble infiniment profond $\{1, \{2, \{3, \{...\}\}\}\}$ est le x_1 de la solution du système d'équations : $x_1 = \{1, x_2\}$, $x_2 = \{2, x_3\}$, $x_3 = \{3, x_4\}$, etc.

Cette possibilité de construire des ensembles infiniment profonds est un outil puissant de modélisation des structures autoréférentes souvent rencontrées en informatique où des objets dépendent mutuellement et cycliquement les uns des autres (jeux de pointeurs, flux de données, machines reliées en réseaux, etc.). Jon Barwise et John Etchemendy, dans leur livre intitulé *The Liar* (« Le menteur »), traitent les phrases autoréférentes et, par exemple, la phrase « je mens » est associée à l'hyperensemble $m = \{\text{faux}, \{m\}\}$ (une valeur de vérité, suivie d'un contexte simple composée dans ce cas de la phrase elle-même).

caractérisé par ses éléments, les connaître c'est le connaître. Les axiomes qui suivent donnent des moyens de construire de nouveaux ensembles à partir d'ensembles déjà connus. Ces axiomes sont les règles « légales » de définition et de manipulation de ces êtres mathématiques que sont les ensembles.

L'axiome de la réunion indique que si E est un ensemble, le regroupement des éléments d'ensembles appartenant à E, c'est-à-dire des x appartenant à des y appartenant à E, constitue encore un ensemble. De $E = \{\{a, b\}, \{\pi, 1/e\}, \{1, 2, 3\}\}$, on déduit l'existence de l'ensemble $\{a, b, \pi, 1/e, 1, 2, 3\}$. Ainsi, l'ensemble des nombres de Fibonacci (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21,...) et l'ensemble des nombres triangulaires (1, 3, 6, 10, 15,...) forment un nouvel ensemble. Vous pouvez « parler » de l'ensemble des éléments présents dans l'un au moins des deux ensembles.

L'axiome de l'ensemble des parties affirme que le regroupement des sous-ensembles d'un ensemble E constitue lui aussi un ensemble. De $E = \{0, 1, 2\}$, on déduit l'existence de $\mathcal{P}(E) = \{\emptyset, \{0\}, \{1\}, \{2\}, \{0, 1\}, \{0, 2\}, \{1, 2\}, \{0, 1, 2\}\}$. Notons « pour le plaisir » que si l'ensemble E a k éléments, il y a C_k^1 éléments individuels, C_k^2 paires d'éléments, etc., et la formule du binôme donne $(1 + 1)^k = 1 + C_k^1 + C_k^2 + \ldots + 1 = 2^k$. L'ensemble des parties de E a ainsi 2^k éléments.

L'axiome de séparation ou **axiome de compréhension restreint** indique que si $P(x)$ est une propriété (telle $x > 3$) et que E est un ensemble, alors les x qui sont dans E et qui vérifient cette propriété restrictive $P(x)$ constituent aussi un ensemble. Il est essentiel de noter que cet axiome permet de définir un ensemble à partir d'une propriété, ce qui est bien sûr souhaitable, mais qu'il impose la restriction de ne prendre que des x présents dans un ensemble déjà connu E.

• Cette définition permet d'envisager l'ensemble des nombres premiers. Pour cela, on part de l'ensemble des entiers (construit préalablement) et de la propriété $P(x)$: « x n'a pas de diviseurs autres que 1 et lui-même. »

• La propriété $x = x$, seule, ne définit pas un ensemble. Si c'était le cas, la formule définirait l'ensemble de tous les ensembles, ce qui contredirait le théorème de Cantor de ZFC.

• « Posséder deux éléments exactement » ne définit pas un ensemble dans ZFC.

C'est la clef de la résolution des paradoxes : elle empêche la définition d'ensembles trop gros. On ne peut pas parler de l'ensemble de tous les ensembles ni de l'ensemble des x qui possèdent la propriété de ne pas être éléments d'eux-mêmes. Les paradoxes de Russell et Cantor sont donc évités, de même d'ailleurs que le paradoxe de l'ensemble des ordinaux et celui de l'ensemble des cardinaux.

L'axiome de remplacement indique que si, étant donnée une fonction R telle que pour tout élément x d'un ensemble E, la fonction R détermine un élément y, alors les éléments y constituent un nouvel ensemble, F. En clair, l'image d'un ensemble E par une fonction R est un ensemble. Contrairement à l'axiome de séparation, l'axiome de remplacement peut engendrer (d'une manière contrôlée) des ensembles F qui ne sont pas inclus dans E.

L'axiome de l'infini indique qu'il existe au moins un ensemble infini E. Il existe plusieurs façons de définir un ensemble infini. L'une d'elles, due à Dedekind, consiste à dire que E est infini si E possède un sous-ensemble F différent de E, et que l'on peut mettre en bijection avec E. Selon cette définition, l'ensemble des entiers est infini, car l'ensemble des entiers peut être mis en bijec-

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

tion avec l'ensemble des entiers pairs en doublant chaque entier (fonction $n \rightarrow 2n$).

L'axiome de fondation (AF), proposé par von Neumann en 1925, est explicité sur la figure 3 : il n'existe pas de chaînes infinies de boîtes-ensembles les unes dans les autres et pas de boîtes-ensembles qui se contiennent elles-mêmes !

L'axiome du choix (le « C » de ZFC) indique que si E est un ensemble d'ensembles non vides, alors il existe un ensemble F qui a un élément commun exactement avec chaque ensemble de E. De $\{\{0, 1, 2\}, \{\pi, 1/e\}, \{A, B\}\}$, on déduit l'existence d'un ensemble F comme $\{2, 1/e, B\}$. L'axiome du choix crée certaines difficultés *(voir l'article d'octobre 2009 de cette rubrique)* et c'est pour cela qu'on le fait apparaître dans le nom ZFC de la théorie.

Il est remarquable que ces simples axiomes, tous assez naturels, permettent l'expression de pratiquement toutes les idées et démonstrations mathématiques et que depuis plus d'un siècle qu'on explore les conséquences de ZFC, jamais aucune contradiction n'y a été découverte. Cependant, la méthode adoptée par ZFC opère une distinction entre ensembles et regroupements (définis seulement par une propriété). Cette distinction interdit de considérer que certains regroupements simples et naturels sont d'authentiques ensembles… ce qui est étrange. En un mot, la solution exprimée dans ZFC apparaît comme une rustine : elle répare la théorie initiale de Cantor, mais elle lui enlève sa beauté et sa généralité. Elle en limite la puissance en interdisant en particulier de mentionner un ensemble universel contenant la totalité des ensembles ou de définir le nombre n comme le regroupement de tous les ensembles possédant n éléments, selon l'élégante idée de Cantor et de Frege.

Les révisions possibles

Une extension de ZFC donne un statut théorique aux regroupements problématiques (ensemble de tous les ensembles, ensembles des ordinaux, etc). Elle consiste à introduire, à côté de la notion d'ensemble, la notion de classes en définissant certaines opérations entre classes, dont en particulier la définition d'une classe à partir d'une propriété. La classe de tous les x qui vérifient $x = x$ correspond à l'ensemble de tous les ensembles. Cette théorie de von Neumann, Bernays et Gödel, notée NBG, est une première méthode pour disposer du droit de mentionner les gros ensembles problématiques interdits dans ZFC. Cependant, cette façon d'étendre ZFC n'est pas jugée satisfaisante, car elle se fonde sur une distinction artificielle et injustifiée entre deux catégories de regroupements, les ensembles et les classes, un peu comme dans une société qui considérerait deux types de citoyens : ceux qui jouissent pleinement de tous les droits (les ensembles), et ceux qui n'en ont qu'une partie sans qu'on sache trop bien pourquoi.

Une méthode plus élégante pour augmenter le pouvoir de ZFC consiste à revoir l'axiome de fondation qui est le dernier historiquement ajouté à ZFC et que d'ailleurs Cantor n'avait pas envisagé du tout.

En interdisant directement l'ensemble de tous les ensembles, l'axiome de fondation est rassurant. Cependant, on s'était déjà débarrassé des paradoxes avant de l'introduire. L'utilisation de l'axiome de fondation ressemble un peu à la méthode consistant à pendre un noyé pour être certain qu'il est bien mort ! Notons aussi que même si AF à lui seul évite le paradoxe de l'ensemble de tous les ensembles, il est inopérant contre d'autres paradoxes et ne constitue donc pas une alternative complète à la doctrine de la limitation de la taille que met en œuvre ZFC.

Le Britannique Peter Aczel, et indépendamment les Italiens Marco Forti et Furio Honsell, ont proposé dans les années 1980 de renoncer à AF et de le remplacer. Acceptons l'idée qu'il y a des ensembles qui appartiennent à eux-mêmes, comme on accepte l'idée qu'il y a des nombres dont le carré est –1, et imposons par un axiome particulier qu'il y en existe de toutes les sortes imaginables.

L'axiome d'antifondation, noté AFA *(voir la figure 3)*, indique non seulement qu'il y a toutes sortes d'ensembles appartenant à eux-mêmes, mais que précisés par une loi adéquate, ils sont uniques. Cette double affirmation d'existence et d'unicité confère à l'axiome AFA toute sa force et en fait l'intérêt. L'axiome AFA crée une révolution comparable à l'introduction des nombres complexes. En plus de tous les « ensembles habituels » qui bien sûr restent des ensembles dans cette théorie, il y a maintenant une multitude d'autres ensembles « antifondés » qu'on dénomme *hyperensembles*.

Les hyperensembles

En particulier, dans la théorie des hyperensembles ZFC – AF + AFA (tous les axiomes de ZFC, moins l'axiome de fondation, plus l'axiome AFA), il y a un hyperensemble unique noté Ω qui vérifie $x = \{x\}$. L'hyperensemble Ω est un être étrange possédant un seul élément, lui-même. D'après AFA, il est le seul à posséder cette propriété. Il représente une sorte de monde autiste, refermé en boucle sur lui-même !

Il y a aussi un hyperensemble unique qui vérifie $x = \{x, \emptyset\}$. C'est un objet étrange qui possède deux éléments : l'ensemble vide et lui-même. Il y aussi l'hyperensemble infiniment profond $\{0, \{1, \{2, \{3, \{…\}\}\}\}\}$ *(voir la figure 3)*.

Ajouter un nouvel axiome comme AFA fait prendre des risques : si ZFC ne conduit jamais à une contradiction, en est-il de même de ZFC – AF + AFA ? La réponse est oui : on ne prend aucun risque avec AFA. En effet, P. Aczel a prouvé un résultat de « consistance relative » analogue à un autre obtenu par von Neumann pour AF : si la théorie usuelle des ensembles, ZFC, ne conduit jamais à une contradiction, alors il en est de même de ZFC – AF + AFA. Les hyperensembles n'introduisent aucun danger particulier de contradiction.

L'intérêt d'une théorie se prouve en l'appliquant. C'est aujourd'hui chose faite pour la théorie des hyperensembles. Les domaines dans lesquels elle a été utilisée sont principalement liés à l'informatique et à l'analyse des paradoxes. Plusieurs livres *(voir la bibliographie)* en donnent le détail. Notons que P. Aczel avait été amené à introduire les hyperensembles alors qu'il étudiait le problème informatique de la représentation formelle des flux de données et la synchronisation entre systèmes communicants fonctionnant

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

4. Les progrès en théorie des ensembles

	ENSEMBLE DE TOUS LES ENSEMBLES	ANTINOMIE DE RUSSELL
THÉORIE CLASSIQUE DES ENSEMBLES ZFC AVEC L'ENSEMBLE DE FONDATION	Le paradoxe est éliminé par l'axiome de compréhension. On ne prend des éléments d'ensembles que dans des ensembles connus. Inconvénient : ce regroupement naturel est éliminé.	Le paradoxe est éliminé par l'axiome de fondation (pas d'emboîtement à l'infini) et il n'y a pas d'ensembles qui se contiennent eux-mêmes. Inconvénient : les ensembles autoréférents seraient utiles.
THÉORIE CLASSIQUE DES ENSEMBLES ZFC AVEC L'ENSEMBLE D'ANTIFONDATION	Le paradoxe est éliminé par l'axiome de compréhension. On ne prend des éléments d'ensembles que dans des ensembles connus. Inconvénient : il n'y a toujours pas de gros regroupements.	L'axiome d'antifondation autorise les emboîtements à l'infini : les ensembles qui se contiennent eux-mêmes existent et sont caractérisés par des équations.
THÉORIE DES TYPES DE RUSSELL	Les deux paradoxes sont éliminés. On considère les ensembles niveau par niveau, le niveau n+1 étant celui des ensembles dont les éléments sont de niveau n. Il existe un ensemble de tous les ensembles par niveau, mais pas d'ensemble vraiment universel, car les niveaux ne se mélangent pas. Inconvénient : il y a une infinité de niveaux et la pratique est difficile.	
THÉORIE NFU (*NEW FOUNDATION* ET URÉLÉMENTS)	Les deux paradoxes sont éliminés. À chaque fois qu'apparaît le symbole d'appartenance $\in$ dans une formule définissant un ensemble, le niveau de la variable à droite doit être n+1 si celui de la variable de gauche est n. Dérivée de la théorie de Russell, cette théorie est d'utilisation plus simple, car les niveaux portent sur les variables et non sur les ensembles.	

de manière ininterrompue comme le sont les ordinateurs connectés en réseaux. Un autre domaine d'application des hyperensembles est celui des bases de données et de la formalisation du langage naturel.

L'ensemble de tous les ensembles ?

La théorie des hyperensembles propose certes une extension de la notion d'ensemble. Mais elle ne donne pas encore la possibilité de parler de l'ensemble de tous les ensembles, car le théorème de Cantor y est toujours valide. C'est sur le problème de traiter de tels « gros regroupements » que des avancées remarquables ont été faites, dont plusieurs ces dernières années.

Au départ, il y a la tentative au début du XX^{e} siècle par Russell d'éviter les paradoxes par sa fameuse « théorie des types » qui a été abandonnée du fait de sa complication. Dans ce système, on considère les ensembles niveau par niveau, le niveau $n+1$ étant celui des ensembles dont les éléments sont de niveau n. Chaque ensemble appartient à un niveau donné et il y a une infinité de catégories d'objets différents, ce qui crée de sérieuses contraintes de manipulation. Le système ZFC, qui n'envisage qu'un seul type d'objets, a donc été préféré.

Les paradoxes sont évités par Russell, car les seules formules autorisées dans sa théorie pour définir par compréhension de nouveaux ensembles doivent respecter le système de niveaux. Une formule comme « x appartient à x » n'a pas de sens dans la théorie, car dans une formule correcte de la théorie des types, la relation d'appartenance ne peut relier que deux niveaux différents.

Reprise par le logicien et philosophe américain Willard Quine en 1937, la théorie des types de Russell est devenue un nouveau système d'axiomes bien plus simple dénommé *New Foundation* (NF). Malheureusement, Ernst Specker démontra en 1953 que NF contredit l'axiome du choix, ce qui rend NF malcommode pour les mathématiciens attachés à l'axiome du choix et qui, même s'ils s'en méfient, veulent pouvoir l'utiliser librement. Cela conduisit alors Ronald Jensen à proposer une nouvelle version de la théorie de Quine, nommée cette fois NFU (car on y introduit des objets dénommés « urléléments ») compatible avec l'axiome du choix. Depuis, cette théorie dont on peut dire qu'elle possède autant de bonnes propriétés que ZFC, tout en permettant de parler et de manipuler l'ensemble de tous les ensembles et d'autres « gros ensembles », est défendue comme un substitut possible à ZFC.

Un livre de Randall Holmes présente NFU d'une manière élémentaire et prouve ainsi que tout ce qui est fait avec ZFC peut l'être aussi commodément avec NFU. Si NFU n'est aujourd'hui pas utilisée, et même est souvent totalement ignorée, c'est sans doute principalement parce qu'elle est apparue tardivement. Voyons comment NFU évite les paradoxes.

Alors que ZFC (avec l'axiome AF ou dans sa version AFA) attaque les paradoxes en limitant la définition des ensembles à partir des formules par la contrainte de l'axiome de séparation, NF et NFU évitent les paradoxes sans cet artifice en exigeant en revanche que les formules qu'on utilise pour définir les ensembles soient « stratifiées ».

« Stratifié » signifie qu'il faut qu'on puisse attribuer des niveaux à chaque variable des formules utilisées pour définir les ensembles, d'une manière telle qu'à chaque fois qu'apparaît le symbole d'appartenance, $\in$, le niveau de la variable à droite soit $n+1$ si celui de la variable de gauche est n. Contrairement à la théorie des types qui obligeait à attribuer des niveaux aux ensembles eux-mêmes (multipliant ainsi des différentes sortes d'objets), ici l'attribution d'un niveau doit seulement se faire sur les variables des formules qu'on veut utiliser pour définir des ensembles. On est passé d'une contrainte globale d'attribution des niveaux à chaque

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

élément de l'Univers, à une contrainte temporaire et syntaxique s'appliquant juste aux formules utilisées pour définir des ensembles et qu'on peut oublier une fois l'ensemble défini. En pratique, la vérification que les formules qu'on utilise sont stratifiées est assez facile et moins contraignante que l'axiome de séparation de ZFC.

Donnons des exemples. La formule $x = x$ ne pose pas de problème. Comme elle n'utilise pas le symbole d'appartenance, elle est considérée stratifiée et, en conséquence, il existe un ensemble U des ensembles vérifiant $x = x$. Cet ensemble U est bien sûr l'ensemble de tous les ensembles qui a donc une existence pleine au sein de la théorie de Quine ou de la théorie de Jensen.

La formule $x \in x$ n'est bien sûr pas stratifiée, de même que la formule $x \notin x$ qui conduirait au paradoxe de Russell. Ces deux formules ne définissent pas d'ensembles et on évite donc le paradoxe de Russell. Si E est un ensemble, la formule $x \notin E$ est stratifiée, ce qui signifie que dans NF ou NFU, le complémentaire d'un ensemble (vis-à-vis de tout) existe, alors que dans ZFC le complémentaire d'un ensemble n'existe que relativement à un autre ensemble.

Le paradoxe de Cantor créé par le théorème de Cantor est évité, car dans NF et NFU le théorème de Cantor n'est plus vrai (sa démonstration s'appuie sur une formule non stratifiée). C'est peut-être dommage, mais c'est le coût qu'il faut accepter de payer pour que l'on puisse parler de l'ensemble de tous les ensembles.

Dans NF et NFU, on peut introduire et manipuler sans problème l'ensemble des tous les ordinaux, et l'ensemble de tous les cardinaux. Ces théories sont donc bien une autre façon de slalomer entre les paradoxes sans jamais s'y cogner. Elles montrent que l'ensemble de tous les ensembles et bien d'autres gros ensembles interdits dans les théories des ensembles de type ZFC (avec AF ou avec AFA) peuvent recevoir un statut simple, au sein d'une théorie mathématique homogène, et que c'est donc une erreur de croire que l'ensemble de tous les ensembles et les autres gros ensembles de ZFC sont des concepts paradoxaux.

Citons R. Holmes, défenseur de NFU y compris pour l'initiation et l'enseignement : « La raison pour laquelle nous croyons que NFU est un bon moyen pour l'apprentissage de la théorie des ensembles est qu'elle autorise presque toutes les constructions naturelles de la théorie naïve des ensembles, qui est celle de Frege et cela sans limitations artificielles. [...] Les nombres cardinaux finis ou infinis peuvent être définis en suivant les idées de Cantor et Frege. De même, pour les ordinaux. [...] Les grosses classes intéressantes sont vraiment des ensembles : c'est le cas de l'ensemble de tous les groupes, de l'ensemble de tous les espaces topologiques [...].»

L'ordre d'arrivée sur le terrain

Venues trop tard sans doute pour s'imposer maintenant devant ZFC, les théories alternatives des ensembles, que ce soient NBG, ZFC – AF + AFA ou NFU, présentent toutes des avantages sur ZFC dont elles étendent le pouvoir de représentation. Ces théories, et d'autres encore que nous n'avons pas mentionnées ici, mettent à la disposition des mathématiciens des univers plus riches et plus étendus (à chaque fois en un sens précis). Elles constituent peut-être de meilleures bases pour fonder les mathématiques et penser l'Univers, y compris celui de la physique. La relative indifférence dont elles sont victimes illustre les aléas de l'histoire des sciences où, comme dans les compétitions militaires et commerciales, l'ordre d'arrivée sur le terrain joue un rôle déterminant, condamnant parfois les meilleurs à jouer les seconds rôles, voire à la mort.

Il serait cependant souhaitable que le plus grand nombre possible de mathématiciens, de scientifiques et de philosophes ait conscience de cette sorte d'injustice et ne pense pas faussement que l'autoréférence ensembliste (x appartient à x) est contradictoire, ni que parler de l'ensemble de tous les ensembles et des autres « grosses classes » (ce qu'on a toujours eu envie de faire) conduit inévitablement au désastre de l'inconsistance. Ce n'est pas vrai.

L'AUTEUR

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

BIBLIOGRAPHIE

R. Holmes, **Elementary set theory with a universal set**, 1998/2010 : http://math.boisestate.edu/ffholmes/holmes/head.ps

L. Moss, **Non-wellfounded set theory**, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2008 : http://plato.stanford.edu/entries/nonwellfounded-set-theory/

R. Holmes, **Alternative axiomatic set theories**, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2006 : http://plato.stanford.edu/entries/settheory-alternative/

J. Barwise et L. Moss, **Vicious circles**, *CSLI Lecture Notes n° 60*, CSLI Publications, 1996.

Th. Forster, **Set Theory with a Universal Set**, Oxford logic guides, n° 31 (2e édition), Cambridge University Press, 1995.

P. Aczel, **Lectures on nonwellfounded sets**, *CLSI Lecture Notes n°9*, 1987.

J. Barwise et J. Etchemendy, **The Liar. An Essay on Truth and Circularity**, Oxford University Press, 1987.

R. Jensen, **On the consistency of a slight (?) modification of Quine's 'New Foundations'**, *Synthese*, vol. 19, pp. 250-263, 1969.

W. Quine, **New foundations for mathematical logic**, *American Mathematical Monthly*, vol. 44, pp. 70-80, 1937.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

ART & SCIENCE

Le Maître des jeans

Un peintre anonyme du XVII^e siècle a représenté plusieurs fois dans ses tableaux des gens pauvres de l'Italie du Nord, habillés d'une toile bleue : celle de nos jeans actuels.

Loïc MANGIN

Pour beaucoup, le jean serait né avec Oscar Levi Strauss au milieu du XIX^e siècle ; il est indissociable de la ruée vers l'or en Californie. Mais cette histoire est celle du pantalon, et non du tissu avec lequel ces vêtements sont fabriqués. Or l'origine de cette étoffe – un tissu de coton constitué d'une trame blanche et d'un fil de chaîne bleu – est à chercher en Europe, et plus précisément dans la région de Nîmes (dont le nom a conduit au terme *denim* pour désigner la toile de jeans) et de Gênes (d'où dérive le mot *jeans*). Cependant, excepté quelques figures de crèche du XVIII^e siècle, les témoignages visuels sont rares.

D'autres ont été récemment découverts. Il s'agit d'une dizaine de tableaux qui ont été attribués à un artiste actif à Gênes, au XVII^e siècle, encore anonyme, et dont huit sont exposés dans une galerie parisienne. Parmi eux, on peut voir la *Femme mendiant avec deux enfants (voir la figure page ci-contre)*. Depuis 2006, Gerlinde Gruber, conservateur au *Kunsthistorisches museum* de Vienne, en Autriche, s'attache à rassembler les œuvres de celui qui est désormais connu sous le nom de Maître de la toile de jeans. Elle s'est fondée sur des critères stylistiques et thématiques pour en reconnaître la paternité d'un unique artiste qui exerçait dans la seconde moitié du XVII^e siècle en Lombardie et en Vénétie.

Sur la plupart des tableaux, on distingue une étoffe bleue qui, lorsqu'elle est abîmée, montre le fil de trame blanc. On a donc bien à faire à une toile de jeans. Qui plus est, dans certaines œuvres, on voit suffisamment bien les coutures pour reconnaître un point utilisé en sellerie, celui qu'arborent les jeans actuels !

Le parallèle va plus loin. La toile de jean fut à ses débuts teinte avec de la guède (le pastel des teinturiers), une plante jadis très cultivée dans le Sud-Ouest de la France. Cependant, ce pigment fut remplacé par l'indigo (également d'origine végétale), meilleur marché et importé des régions chaudes, notamment de Gênes, favorisé par son port. Or l'analyse de prélèvements effectués sur les tableaux a montré que le peintre a utilisé de l'indigo pour ses bleus !

Courtoisie de la galerie Canesso

Dans l'Italie de cette époque, ce tissu très résistant, fabriqué à Gênes, est utilisé pour des vêtements destinés aux classes sociales les plus modestes, ainsi qu'aux militaires ; en témoigne la veste passementée du *Petit mendiant avec une part de tourte (voir ci-dessus)*. Les vêtements étaient probablement transmis aux générations suivantes et portés jusqu'à l'usure, ce qui explique la rareté des témoignages.

La représentation d'individus humbles et de mendiants, dont aucun ne semble se plaindre, inscrit le Maître de la toile de jeans dans le courant nommé « peinture de la réalité » dont les chefs de file furent les frères Le Nain. Les représentations de la pauvreté sont alors nombreuses à travers toute l'Europe, de Vélasquez en Espagne jusqu'à des artistes flamands, en passant par Georges de La Tour.

Le jean tel qu'on le porte aujourd'hui est-il né à Nîmes ou à Gênes ? La ville française fut un important centre de production textile, et notamment de cotonnades, à partir du XVIII^e siècle et exporta beaucoup, en particulier vers l'Angleterre et, partant, vers l'Amérique du Nord. Toutefois, Gênes et tout le Nord de l'Italie en constituaient une plaque tournante du marché du coton depuis le XII^e siècle. Et la toile de Gênes eut aussi son heure de gloire à l'export, et sans doute avant le denim : l'étoffe, peu chère et de bonne qualité, est mentionnée dans les comptes d'un tailleur du Lancashire, en 1614.

Selon l'historienne Marzia Cataldi Gallo, les deux dénominations (jeans de Gênes et denim de Nîmes) coexistent aux États-Unis à la fin du XVIII^e siècle. L'histoire du jean n'a pas encore livré tous ses secrets, mais d'ores et déjà, on doit remplacer le chercheur d'or américain par un mendiant de Lombardie.

« Il Maestro della tela jeans », exposition jusqu'au 27 novembre, à la galerie Canesso, 26, rue Laffitte, 75009 Paris.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Courtoisie de la galerie Canesso

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

IDÉES DE PHYSIQUE

Les hologrammes, du vrai 3D

L'holographie, capable de restituer l'image entière d'un objet dans ses trois dimensions, reste une technique d'avant-garde.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

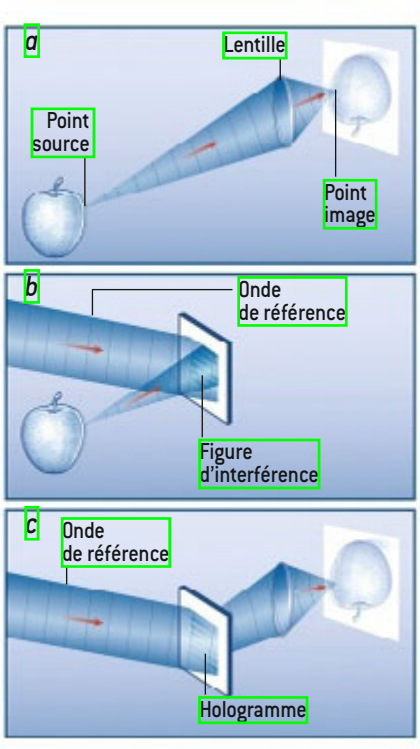
Cinéma 3D, bientôt écrans d'ordinateur et appareils photo 3D : les dispositifs pour voir en relief se multiplient ces derniers temps. Ils sont conçus pour donner l'illusion du relief en jouant avec la vision stéréoscopique humaine. C'est l'occasion de rappeler que l'holographie, elle, peut reconstituer une image tridimensionnelle et fidèle d'un objet quelconque. Et plus qu'une technique de photographie à trois dimensions, l'holographie offre la possibilité de réaliser des composants optiques particuliers ou des procédés optiques d'authentification.

Avant d'aborder l'holographie, rappelons ce qui se passe en photographie. Quand on éclaire un objet opaque, sa surface diffuse de la lumière dans toutes les directions. On peut intercepter cette lumière en regardant l'objet, ou en la focalisant sur une plaque photographique grâce à un objectif. Une photographie est ainsi une projection, sur un plan, d'une scène à trois dimensions. Qu'enregistre-t-elle ?

Sauvegarder la phase de l'onde lumineuse

La lumière visible est composée d'ondes électromagnétiques sinusoïdales de différentes fréquences (ou couleurs). Chacune de ces ondes est caractérisée par l'amplitude de son oscillation, mais aussi par une phase, qui indique à quel stade dans le cycle d'oscillation l'onde se trouve à un instant donné.

Or un capteur photographique, qu'il soit chimique ou électronique, ne reproduit pas



1. GRÂCE À UNE LENTILLE, on focalise la lumière issue d'un point objet en un point image *(a)*. Le même point image peut être obtenu en l'absence de l'objet, par le principe de l'holographie. La méthode consiste d'abord à créer et enregistrer une figure d'interférence, avec de la lumière laser (monochromatique et cohérente). Si le point source se trouve assez loin face à un écran, ce dernier est éclairé uniformément et la phase de l'onde lumineuse y est constante ; en superposant à cette onde une « onde plane » de référence arrivant de biais, on crée une figure d'interférence formée de bandes alternativement sombres et brillantes *(b)*. Cette figure étant enregistrée, son éclairage par l'onde de référence restitue le point image, en l'absence du point source *(c)*.

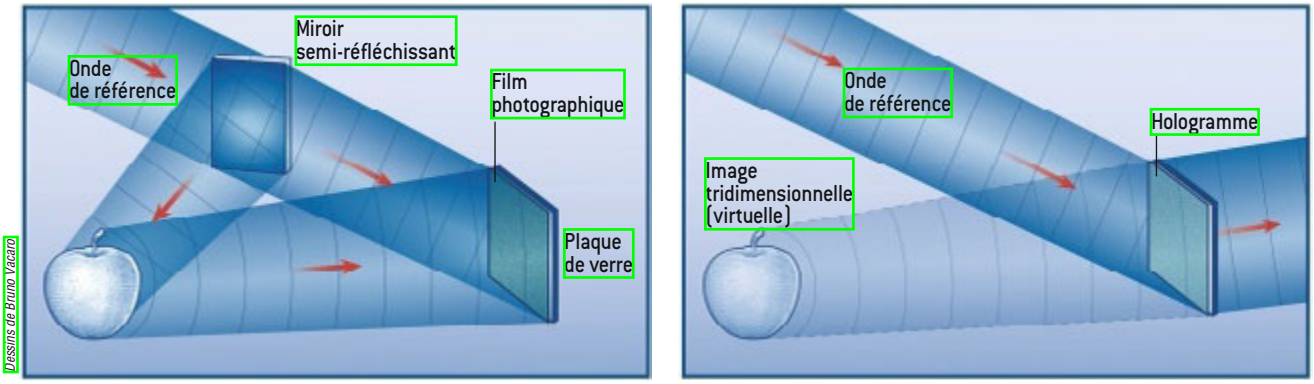
complètement le champ lumineux reçu. En chaque point de détection, il enregistre l'intensité lumineuse moyennée sur la durée d'exposition (soit, à un facteur constant près, le carré de l'amplitude), mais pas les phases des ondes. Or ces phases indiquent les retards relatifs des ondes. Ces retards dépendent de la distance parcourue par les ondes depuis l'objet et portent ainsi en eux une information sur le relief.

D'où l'enjeu : si l'on enregistrait à la fois l'amplitude et la phase des ondes issues de l'objet, c'est-à-dire le champ électromagnétique original, il serait possible de restituer une image complète, tridimensionnelle, de l'objet. C'est le physicien hongrois Dennis Gabor qui, en 1947, trouva la solution à ce problème dans le cadre de la microscopie électronique. Mais il a fallu l'apparition du laser dans les années 1960 pour que sa solution soit appliquée dans le domaine de l'optique et devienne l'holographie.

Considérons pour simplifier une onde lumineuse monochromatique (d'une seule couleur). Comment mémoriser sa phase ? En la faisant interférer avec une onde de référence qui éclaire simultanément la plaque photographique.

Si, en un point donné, les oscillations des deux ondes sont en phase, elles atteignent leurs maximums en même temps et leur addition donne une amplitude plus élevée, donc une intensité lumineuse supérieure. Si, au contraire, les deux ondes vibrent en opposition de phase, leur addition produit une onde d'amplitude inférieure, donc plus obscure. Le déphasage entre l'onde de référence, parfaitement connue, et l'onde

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010



Dessins de Bruno Vacaro

2. POUR ENREGISTRER L'HOLOGRAMME D'UN OBJET, on envoie le faisceau laser de référence sur un miroir semi-réfléchissant *(ci-dessus, à gauche)*. Une partie de l'onde lumineuse atteint le film photographique directement, tandis que l'autre va vers l'objet. Une fraction de l'onde réfléchie et diffusée par l'objet atteint le film photographique et y interfère avec l'onde de référence. La figure d'interférence (qui, pour un objet non ponctuel, ressemble à un ensemble aléatoire de taches, des « tavelures ») est enregistrée par le film photographique. Dans la phase de restitution *(à droite)*, on éclaire l'hologramme ainsi obtenu avec l'onde de référence ; le faisceau qui en ressort forme une image tridimensionnelle (et virtuelle, car elle se situe dans le prolongement imaginaire du faisceau) de l'objet.

lumineuse dépend du lieu : sur la plaque photographique apparaît alors une figure d'interférence. Cette répartition inégale de l'intensité lumineuse code la phase de l'onde à enregistrer *(voir la figure 1)*.

Ce qui est remarquable, c'est que la photographie de cette figure d'interférence permet de reconstituer l'onde initiale. Comment ? Réalisons à partir de cette photo une diapositive en « positif », c'est-à-dire opaque pour les zones obscures et transparente pour les zones brillantes. Éclairons cette diapositive, nommée hologramme par transmission, avec une onde identique à l'onde de référence. Dans le plan de cette diapositive, l'intensité de la lumière est proportionnelle à celle qui résulte de la figure d'interférence. En outre, là où l'intensité est maximale (respectivement minimale), la phase, qui est celle de l'onde de référence, est identique (respectivement opposée) à celle de l'onde enregistrée.

Comme à travers une fenêtre

Autrement dit, dans ce plan, on a restitué exactement les caractéristiques de l'onde à enregistrer. Or les équations de propagation de la lumière assurent que si l'on a reconstitué l'onde dans un plan, tel est aussi le cas pour la propagation au-delà de ce plan. C'est le « principe de Huygens-Fresnel ». La lumière qui émerge de l'hologramme est donc identique à celle initialement issue de l'objet et de l'onde de référence *(voir la figure 2)*.

En regardant à travers l'hologramme, on apercevra l'objet comme à travers une fenêtre : il paraîtra plus proche si l'on s'avance, on verra apparaître des parties cachées en se déplaçant sur le côté, il restera entièrement visible en ne conservant qu'un morceau d'hologramme comme à travers une fenêtre partiellement obstruée. Les calculs confirment que ce que nous venons d'esquisser est exact (à ceci près qu'ils prévoient aussi la formation d'une image réelle fantôme, qu'il est en pratique facile d'éliminer).

Quelques astuces ont rapidement permis d'étendre la fidélité de la reproduction holographique. En enregistrant successivement, sur la même plaque photographique, trois hologrammes en trois couleurs de base (rouge, vert et bleu), on reconstitue une image en couleurs en éclairant l'hologramme en lumière blanche. En entourant un objet par un film cylindrique et en l'éclairant avec l'onde de référence par le dessus, on pourra observer son image sous tous les angles, lors de la restitution, en tournant autour de l'hologramme cylindrique. Et en profitant de l'épaisseur de la plaque photographique, on peut conserver dans un même hologramme des milliers d'images.

LES AUTEURS

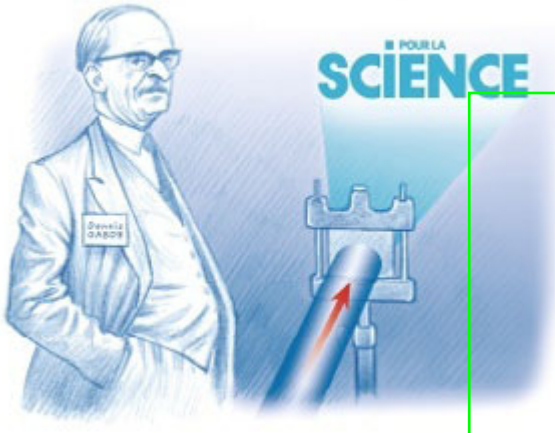
Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs de physique
à l'Université Pierre
et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://idphys.free.fr

BIBLIOGRAPHIE

F. Wyrowski et O. Bryngdahl, **Digital holography as part of diffractive optics**, *Reports on Progess in Physics*, vol. 54(12), pp. 1481-1571, 1991.

M. Françon, **L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser**, Hachette/CNRS, 1986.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur **www.pourlascience.fr**



3. ON PEUT CRÉER DES HOLOGRAMMES synthétiques en calculant numériquement la figure d'interférence que créeraient une onde de référence et un objet imaginaire. On peut aussi calculer et réaliser l'hologramme qui, éclairé par le faisceau de référence, projettera une image donnée sur un écran. L'avantage est que le système de projection est très simple et que l'image projetée est nette partout (mais à chaque image correspondra un hologramme différent).

Certaines applications sont cependant plus inattendues. De même que l'on réalise des images de synthèse, il est maintenant possible de faire des hologrammes synthétiques, en calculant numériquement la figure d'interférence créée entre une onde de référence et un objet virtuel. Des techniques de microlithographie permettent alors de réaliser un hologramme qui, une fois éclairé par l'onde de référence, reconstituera en trois dimensions l'image d'un objet n'ayant jamais existé !

Par ailleurs, il est habituel d'enregistrer et de reconstituer l'onde qui provient d'un objet ; mais il est tout à fait possible de reconstituer l'onde qui part d'un dispositif tel qu'un projecteur. Dans ce cas, l'onde issue de l'hologramme forme une image avec un dispositif particulièrement simple, compact et robuste qui ne demande aucun réglage : un laser éclairant une lame de verre ou de plastique sur laquelle l'hologramme est imprimé *(voir la figure 3)*.

Les hologrammes sont aussi très utiles pour authentifier ou sécuriser divers dispositifs, tels les billets de banque de forte valeur ou les cartes de paiement. Dans ces applications, l'hologramme est imprimé en relief : c'est dans la profondeur que la gravure retranscrit la phase de l'onde. Ces hologrammes sont très difficiles à reproduire, qu'il s'agisse de les imprimer ou de réaliser l'original qui sert à l'impression. Il est en outre possible d'ajouter à l'image du motif visible une image aléatoire que seul le possesseur du filtre adapté pourra identifier.

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

SCIENCE & GASTRONOMIE

Ces recettes parfois superflues

Combien de temps faut-il pour cuire les viandes ? L'analyse dimensionnelle offre une réponse... universelle.

Hervé THIS

Dis-moi quel est ton feu, je te dirai qui tu es ! Au début, l'humanité (méritait-elle ce nom ?) mangeait cru. Puis elle apprit à cuire, parce que les aliments cuits sont plus digestes, plus appétissants, comme l'a montré l'étude d'animaux sauvages en captivité, et se conservent mieux. D'abord il y eut le rôtissage, mais, alors que les famines étaient récurrentes, le procédé apparut médiocre : la viande chauffée se contracte, expulsant des jus nutritifs qui sont perdus. S'imposa alors l'usage économiquement judicieux de creuser un trou, d'y mettre de l'eau, et de jeter des pierres chauffées afin de chauffer l'eau où était placée la viande : c'était l'ancêtre de notre pot-au-feu.

Toutefois, la viande rôtie a des attraits que la viande bouillie n'a pas, et le rôtissage est resté un mode de cuisson qui séduit, encore aujourd'hui, au point que les viandes à griller valent souvent trois à quatre fois plus cher que les viandes à braiser.

Entre-temps, il y eut des progrès : d'abord, les cuisiniers comprirent que la viande cuisait tout aussi bien si elle était mise à côté du feu, et non dessus : les rayonnements infrarouges se propagent tout aussi bien horizontalement que verticalement ! En outre, la viande ainsi rôtie est bien supérieure : d'une part, elle ne se couvre pas de particules noires âcres, ni ne se charge de benzopyrènes cancérogènes ; d'autre part, les jus peuvent alors retomber dans une lèchefrite placée sous la viande. Mieux encore, nos ancêtres inventèrent la « coquille », un réflecteur métallique qui, placé derrière la viande, accélérait le rôtissage.

Puis vint la décrépitude : quand le gaz apparut à tous les étages, selon la formule consacrée, on en vint à cuire dans des fours clos, chauffés au gaz, et la guerre fit rage dans le milieu culinaire. Elle était justifiée, car le résultat donné par le nouveau procédé n'est en rien comparable au véritable rôtissage, en milieu ouvert, dans un air bien sec, qui favorise l'évaporation de l'eau des viandes et amène un joli croustillant.

Demeurent toutefois, dans l'hypothèse d'un véritable rôtissage, des questions : faut-il approcher la viande progressivement de la source de chaleur, ou bien la reculer, ou encore la laisser à une distante constante ? Faut-il badigeonner la surface avec de l'huile pour l'avoir bien croustillante ? Et, surtout, combien de temps faut-il cuire ?

Pour cette dernière question, la technique de l'analyse dimensionnelle donne une réponse qui évite les calculs. Supposons que la température de cuisson soit fixée ou que la puissance de chauffage soit maintenue pendant toute la cuisson. La cuisson de la viande s'effectuant par conduction, à partir de la surface, on comprend que la masse de la pièce à rôtir soit un paramètre essentiel, relié d'ailleurs au « rayon » (si l'on suppose que la viande est une boule, ou un cylindre dont on néglige les extrémités). D'autres paramètres s'imposent : d'abord la conductivité thermique, puisque la viande cuira plus vide si la conduction se fait bien ; ensuite la capacité calorifique, puisque la chaleur se transmet si elle n'est pas stockée ; enfin la densité de la viande.

En première approximation, supposons que le temps de cuisson soit proportionnel à la masse à une certaine puissance a, multipliée par la densité à une puissance b, multipliée par la conductivité thermique à une puissance c, multipliée par la capacité calorifique à une puissance d. Le temps s'exprime en secondes, tandis que les autres paramètres ont leurs propres unités, respectivement le kilogramme, le kilogramme par mètre cube, le mètre kilogramme par seconde et par degré, le mètre carré par seconde carrée et par degré.

Au total, il faut que les puissances a, b, c, d, soient choisies de telle sorte que l'égalité du temps et du produit des quatre autres paramètres soit assurée, du point de vue des unités. Une simple résolution d'un petit système linéaire d'équations conduit à conclure que le temps de cuisson est proportionnel à la masse à la puissance 2/3, à la densité à la puissance 1/3, à la capacité calorifique, et à l'inverse de la conductivité thermique.

Retenons surtout que le temps de cuisson varie comme la masse à la puissance 2/3. Est-ce réaliste ? Madame Saint Ange, auteur d'un *best-seller* culinaire un peu ancien (1925), mais toujours réédité, conseille de cuire 15 à 16 minutes par livre pour un rôti de un kilogramme, mais seulement 10 à 12 minutes par livre pour un rôti de 1,8 à 2 kilogrammes. Si l'on divise le temps de cuisson par la masse à la puissance 2/3, on obtient 32 dans le premier cas, et 30,2 dans le second : le facteur de proportionnalité est donc raisonnablement constant, surtout si l'on tient compte des incertitudes des recommandations culinaires. Bref, l'analyse dimensionnelle, un outil trop oublié et pourtant d'application aisée, réfute l'aphorisme selon lequel on deviendrait cuisinier, mais on naîtrait rôtisseur !

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).

Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

MATHÉMATIQUES

La chasse aux trésors mathématiques

Ian Stewart

Flammarion, 2010
(398 pages, 20 euros).

Avez-vous déjà joué avec un maître d'échecs, avec un joueur de bridge virtuose, avec un champion de dames ? Face à eux, on se sent submergé par une impuissance panique : on ne sait pas quoi faire !

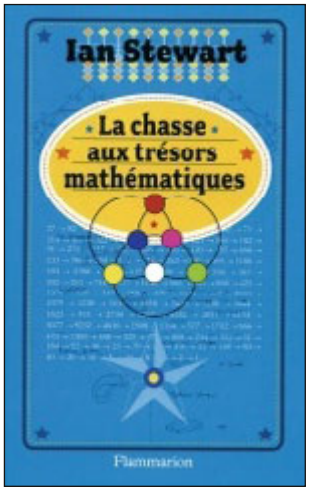
Cette même angoisse existe devant la plupart des ouvrages de mathématiques, même vulgarisés. Les formules y sont toujours effrayantes de concision, et le lecteur doit décrypter le vocabulaire et les raisonnements avec un soin assez peu ludique.

I. Stewart ne fait pas partie de ces écrivains qui demandent trop à leur public. Le lecteur sent qu'il a à ses côtés un ami, qui lui explique les facéties des mathématiciens. Les textes de ce recueil sont courts, ils entremêlent des problèmes et des anecdotes mathématiques. Dans les problèmes, l'idée principale est bien mise en valeur : les mathématiques sont plus des idées que du calcul et les mathématiques compliquées peuvent quelquefois s'entrevoir sur des cas simples. De surcroît, ce mélange d'anecdotes, de petits problèmes, de filiations mathématiques expliquées nous font entrer dans le monde inconnu de ces extraterrestres de la pensée abstraite que sont les mathématiciens, et nous le rend abordable.

Et ne méprisons pas les petits exercices mathématiques : il existe bien des exemples où une curiosité mathématique devient l'embryon d'un domaine mathématique, quand les résolveurs de problèmes passent la main aux constructeurs de théories. Le grand mathématicien indien Ramanujan procédait, en théorie des nombres, à partir de petits exemples pour construire des pans entiers des mathématiques ; la topologie est née d'une petite question sur la traversée des ponts de Königsberg, que I. Stewart a notée, à l'âge de 14 ans, dans son premier bloc de curiosités mathématiques.

Cette note nous donne d'ailleurs l'occasion de saluer cet ancien auteur de *Pour la Science* : merci Ian pour cet intéressant livre !

→Philippe Boulanger



HISTOIRE DES SCIENCES

Aux origines de la chimie organique

Sacha Tomic

Presses universitaires de Rennes, 2010
(322 pages, 20 euros).

En chimie, les récits historiques privilégient souvent la notion de révolution chimique ou l'exposé des controverses. Or, dans ces textes, rien de tel ne semblait traverser le premier tiers du XIXe siècle. Cette période intermédiaire manquait d'études approfondies sur l'émergence de la chimie organique elle-même. Sacha Tomic, chimiste et historien, apporte ici un éclairage précieux sur ses origines.

À partir de centaines de sources imprimées que constitue la production littéraire des pharmaciens et des chimistes, connus ou inconnus, sur la période, l'auteur étudie le domaine de la pratique de laboratoire qu'est l'analyse. Par l'analyse immédiate, qualitative, le pharmacien isole le principe actif d'une matière médicale. L'amélioration des instruments de physique et de chimie, la notion de réactif, le rôle des solvants (eau, alcool, éther) et leur utilisation judicieuse au cours de protocoles de plus en plus sophistiqués enrichissent la chimie de nouvelles substances d'origine naturelle ou résultant d'une réaction. Ces pharmaciens-chimistes empruntent aux chimistes leurs méthodes et contribuent à de nombreuses découvertes, dont celle du premier alcaloïde (morphine) en 1817 et celle de la quinine en 1820.

Dans le même temps, les chimistes mettaient au point une analyse dite élémentaire, quantitative, dans la droite ligne des travaux de Lavoisier et de la théorie atomique de Dalton, pour connaître les proportions des éléments chimiques (carbone, hydrogène, oxygène, puis azote) présents dans la substance pure afin d'en donner une formule empirique, vite traduite en symboles grâce aux propositions de Berzélius (C pour carbone, H pour hydrogène, etc.). L'auteur explique en détail les innovations techniques et les apports théoriques, montrant ainsi que l'évolution des méthodes et des techniques des deux milieux, pharmaciens et chimistes, conduit à redéfinir les domaines respectifs

de la chimie et de la pharmacie. Le pharmacien a dépassé l'usage « simple » de l'officine pour répondre aux demandes de la société (médicaments, chimie légale, vie quotidienne) et aux exigences des chimistes (substances pures et standards), grâce à une industrie pharmaceutique prometteuse.

La frontière, de plus en plus évanescente entre la chimie animale et la chimie végétale, a conduit des chimistes comme Thenard, Dumas et Liebig à repenser leur discipline dans les années 1830. Cependant, S. Tomic insiste sur le fait qu'il n'y a pas eu de changement brusque, mais une accumulation d'innovations et de pratiques, fruit d'un travail collectif émaillé de tensions et de collaborations, qui conduit à l'émergence de la « chimie organique ». Le mot émergence, particulièrement bien choisi, sous-tend cette notion de « lent commencement », qui fait que peu à peu un corpus de notions s'impose.

On ne peut que recommander cet ouvrage, d'une densité riche à souhait, qui apporte des éléments de compréhension sur une période encore peu étudiée en France.

→Danielle Fauque
GHDSO-Orsay

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

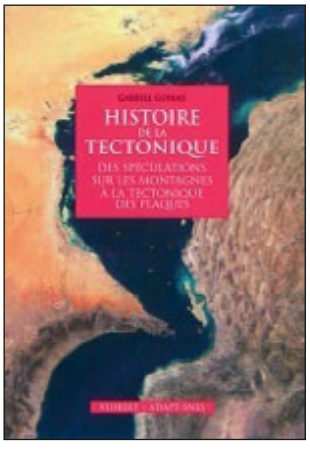
➜ HISTOIRE DES SCIENCES

Histoire de la tectonique

Gabriel Gohau
Vuibert, 2010
(160 pages, 22 euros).

L'auteur, historien des sciences, revient sur plus de mille ans de questionnements quant à la genèse des montagnes et à leur évolution. Il retrace l'histoire des idées qui ont conduit de la théorie aristotélicienne de paysages terrestres en évolution cyclique permanente à la théorie de la dérive des continents.

C'est au siècle des Lumières que les savants commencent à faire des montagnes des objets d'étude, réalisant alors de premières mesures sur le terrain pour comprendre leur naissance et leur évolution. Les hypothèses sont multiples et donnent lieu à de virulentes polémiques. Nombreux sont ceux qui, tel Buffon, soutiennent l'idée d'une inclinaison originelle des strates de notre planète, à l'instar des partisans du neptunisme, qui croient à un dépôt sur une base inégale. Pour le géologue anglais James Hutton, dont la théorie triomphe à l'orée du XIXe siècle, c'est le feu brûlant au cœur de la Terre qui soulève les montagnes.



L'idée d'une chaleur initiale de notre planète est reprise au XIXe siècle par deux géologues – le Français Léonce Élie de Beaumont et le Suisse Eduard Suess –, mais cette fois avec la volonté de voir la formation des montagnes comme le fruit de l'évolution globale de la Terre. Pour le premier, la répartition des chaînes ne s'est pas faite par hasard : elle répond à un réseau qu'il qualifie de pentagonal. Pour le second, le surgissement des montagnes est causé par la contraction du globe liée à son refroidissement. En 1912, se fondant sur ces travaux, mais aussi sur les découvertes paléontologiques les plus récentes, Alfred Wegener énonce sa théorie de la dérive des continents, où il met notamment en évidence la concordance des côtes de part et d'autre de l'Atlantique.

Outre l'exposé limpide de ces différentes théories et de leurs articulations, l'un des grands mérites de l'auteur est de jalonner son récit d'extraits des principaux ouvrages qui ont façonné l'histoire de la géologie, ce qui permet au lecteur d'appréhender de façon originale l'histoire de la tectonique au fil des siècles.

➜ Alexis Drahos
Université Paris-Sorbonne

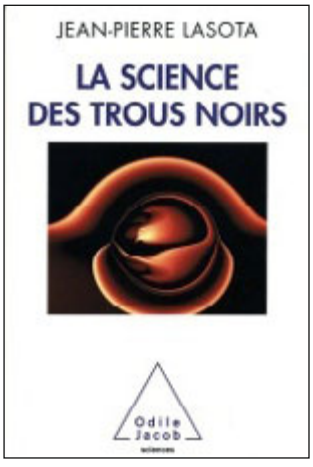
➜ ASTROPHYSIQUE

La science des trous noirs

Jean-Pierre Lasota
Odile Jacob, 2010
(192 pages, 22 euros).

Les trous noirs ne sont pas des rêves de physiciens : ils existent vraiment ! L'auteur, directeur de recherche émérite à l'Institut d'astrophysique de Paris, a l'art de nous les expliquer efficacement et sans formalisme mathématique.

L'expression trou noir a été introduite par John Wheeler en 1967, mais l'auteur nous révèle que, déjà, pendant l'âge d'or de la physique newtonienne, John Mitchell, puis Simon Laplace,



avaient envisagé l'existence de « corps obscurs ». De ces pièges, la lumière ne pouvait guère s'échapper loin. Toutefois, la théorie décrivant les trous vraiment noirs que l'on a découverts aujourd'hui n'est pas newtonienne, mais relativiste et quantique. Son résultat essentiel est que le rayon d'un trou noir, nommé par les astrophysiciens rayon de Schwarzschild, vaut à peu près (en kilomètres) $3M_t/M_s$, où M_t est la masse du trou noir et M_s celle du Soleil.

D'un certain point de vue, un trou noir est la conséquence la plus pure parce que la plus extrême de la gravitation einsteinienne. Le destin ultime de toute étoile est en effet de devenir un objet compact. Selon sa masse, elle deviendra plutôt une naine blanche, une étoile à neutrons, ou un trou noir. Ainsi, une étoile à neutrons typique a une masse de $1{,}4M_s$ (la « limite de Chandrasekhar ») et un rayon de dix kilomètres, contre quatre kilomètres seulement pour

Brèves

LE PLUS GRAND DES HASARDS

Jean-François Dars et Anne Papillault
Belin, 2010
(220 pages, 20 euros).

La mécanique quantique est réputée étrange et incompréhensible, mais elle ne l'est pas ! Pour s'en rendre compte, quoi de mieux que d'écouter les témoignages de ceux qui vivent au quotidien dans le monde quantique, en d'autres termes qui étudient le monde à l'échelle microscopique ? Ce livre élégant rassemble portraits photographiques, témoignages et impressions de nombreux physiciens quantiques, du thésard au prix Nobel.

LE LASER

Fabien Bretenaker et Nicolas Treps
EDP Sciences, 2010
(180 pages, 19 euros).

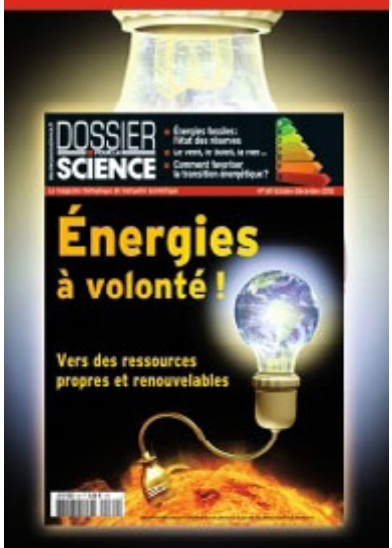
Deux physiciens, utilisateurs en virtuose du laser dans leur recherche, ont eu envie de faire le point sur cet instrument optique. Racontant son histoire, passant en revue l'essentiel de ses mirifiques retombées, ils expliquent clairement sa nature et font apprécier son utilité incroyablement diverse au fil de leurs pages bien illustrées.

MARSOULAS

C. Fritz et G. Tosello
Errance, 2010
(56 pages, 27 euros).

Depuis 1998, la grotte ornée de Marsoulas est réétudiée par les auteurs. Ils expliquent ici comment ils ont restitué les gravures peintes de la grotte afin d'en révéler l'originalité stylistique. Ce témoignage sur le long sauvetage d'œuvres dissimulées sous la gangue du temps est, en plus, joliment résumé dans un documentaire fourni avec le livre.

Actuellement en kiosque



Les énergies fossiles ont un temps semblé ne jamais devoir se tarir. Aujourd'hui, la situation a évolué : les réserves s'épuisent et les rejets liés à cette consommation nuisent à l'environnement. Les énergies alternatives – celles du vent, du Soleil, de la mer, des profondeurs de la Terre – sont mobilisées. La transition énergétique a commencé.

Dossier Pour la Science n° 69 • oct.- déc. 2010

En vente également sur www.pourlascience.fr

un trou noir stellaire de même masse. Les étoiles à neutrons en rotation rapide et fortement magnétisées forment les pulsars, découverts en 1967 par l'Américaine Jocelyn Bell. Les quasars ou noyaux actifs de galaxies (les premiers ont été observés en 1960) doivent leur énergie à la chute de matière sur un objet de plus d'un million de masses solaires : un trou noir !

À lire l'ouvrage, nous apprenons ainsi que l'existence de ce type d'objet a été décrite dès 1916 par la solution des équations de la relativité générale trouvée par l'Allemand Karl Schwarzschild dans le cas particulier d'une symétrie sphérique, mais on n'en comprit la signification physique que 50 ans plus tard…

À ce propos, nous explique l'auteur, il importe de comprendre que, contrairement à une idée trop simple, la gravitation n'arrête pas la lumière. La « surface » d'un trou noir à symétrie sphérique est en réalité un horizon : de l'extérieur, on ne peut jamais voir ce qui se passe à l'intérieur, aucune information ne peut en sortir. Afin de mieux nous faire comprendre ce concept, l'auteur présente des expériences de pensée, dont celle-ci : une horloge placée dans un trou noir, observée de loin, s'y arrêterait, ce qui revient à dire qu'une dilatation infinie du temps a lieu à la surface d'un trou noir.

Nous découvrons ensuite qu'un trou noir se trouve au centre de notre Galaxie. Là, des étoiles gravitent à environ 100 fois la distance Soleil-Terre autour d'une masse de trois à quatre millions de masses solaires, parfaitement invisible. Pour la voir, il faudra attendre que les physiciens soient parvenus à détecter un nouveau type d'ondes – les ondes gravitationnelles –, que ce monstre installé au milieu de la Galaxie est censé émettre… Comme l'écrit l'auteur, la théorie des trous noirs est encore pleine de… zones d'ombre.

→ Michel Toulmonde
Observatoire de Paris (SYRTE)

→ ÉCOLOGIE

Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière

Marion Gosselin et Yoan Paillet
Quæ, 2010
(156 pages, 29 euros).

L'objectif affiché lors du Grenelle de l'environnement et des Assises de la forêt en 2007 / 2008 est de produire plus tout en respectant la biodiversité. Oui, mais comment ? Cet ouvrage de gestion sylvicole axé sur la préservation de la biodiversité décrit 20 actions à mettre en œuvre à l'échelle d'une forêt.

Les 16 premières sont individuelles : elles consistent par exemple à privilégier la régénération naturelle, à adapter les calendriers des coupes et travaux, à maintenir du bois mort, etc. ; les quatre dernières sont collectives et concernent le territoire plus vaste dans lequel s'inscrit la forêt.

Tout cela, qui est très pratique, s'adresse en priorité aux forestiers, mais aussi – pourquoi pas ? – aux milliers de petits propriétaires de quelques arpents de forêts hérités du passé de leur famille. Le livre aura la même utilité pour tous les naturalistes et autres usagers passionnés de la forêt, qui ignorent souvent dans quelle logique s'inscrivent les actions des gestionnaires des grandes forêts domaniales.

Ainsi, tous les habitués de la sylve apprécieront de pouvoir mieux décrypter, grâce aux fiches par actes de gestion courante, les transformations opérées devant eux dans la forêt. L'étude des arguments proposés par les auteurs pour mieux communiquer avec le public, avec photos d'espèces et d'habitat à l'origine des panneaux qu'ils rencontrent en promenade, les éclairera.

Comme le disait en 1905 Henri Algan, un illustre enseignant de l'École forestière : « La forêt, ce n'est pas seulement les arbres [...] ce sont les humbles plantes que nous foulons, [...] c'est mille autres choses encore, mille riens charmants… » Pour en prendre conscience, pourquoi ne pas explorer petit à petit la mine d'information que représentent cet ouvrage et sa bibliographie sur l'immense diversité animale, végétale et fongique de la forêt ?

→ Régine Touffait
ONF Villers-Cotterêts

.fr Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – NOVEMBRE 2010 – N° d'édition 077397-01 – Commission paritaire n° 0907K82079 du 19-09-02 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/159 111 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés. Société d'assurance mutuelle Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, Assistance Protection Juridique, Fidélia Assistance et GMF Vie. Le contrat Santé est conçu par la Mutuelle Générale. La Mutuelle Générale, mutuelle soumise aux dispositions du livre II du code de la mutualité immatriculée au registre Nationale des Mutuelles sous le n°775 685 340, 6 rue Vandrezanne 75634 Paris Cedex 13.

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

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance

casden

BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine

notre identité reflète

nos valeurs

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

■ Coordonnées disponibles sur www.casden.fr