POUR LA SCIENCE

NUMÉRO SPÉCIAL

POUR LA
# SCIENCE

lovembre 2011 - n° 409 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

# L'univers des ONDES

## Quand la physique dépasse ses limites

Remonter le temps
Prévoir les tsunamis
Explorer le cerveau
Sonder la Terre
Écouter les étoiles
Scruter la matière

M 026[illegible] 409 S - F: 6,70 €

Allemagne : 10 € - Belgique : 7,70 € - Canada /S : 12,40 CAD - Grèce /S : 8,20 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,90 € - Guyane /S : 7,90 € - Italie : 7,80 € - Luxembourg : 7,80 € - Maroc : 68 MAD - Martinique /S : 7,90 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 1100 XPF - Polynésie Française /S : 1100 XPF - Portugal : 7,80 € - Réunion /A : 10 € - Suisse : 12,90 CHF.

GMF
C'EST RASSURANT DE POUVOIR COMPTER
SUR UNE ÉPARGNE SOLIDE
ET PERFORMANTE.
Crédit photo : Getty Images/Rolfo - TBWA\PARIS
LABEL D'EXCELLENCE 2011
ALTINEO
ÉPARGNE
3,90%*
TAUX SERVI EN 2010
À LA GMF,
VOUS CONSTRUISEZ
VOTRE AVENIR
EN TOUTE SÉRÉNITÉ !
Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE
GMF
Assurément Humain
*3,90% - Taux net servi en 2010, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour les contrats d'assurance-vie Altinéo, Compte Libre Croissance et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. GMF VIE - Société anonyme au capital de 169 787 440 € entièrement versé. Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris B 315 814 806 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 - Adresse postale : 10 - 14, avenue Louis Armand - 95127 Ermont Cedex.

POUR LA SCIENCE
WWW.

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle, Cécile Fourrage
Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur : Guillaume Jacquemont
Cerveau & Psycho
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju
Marketing : Élise Abib
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Marie-Annick Guillon-Galland, Philippe Ciofi, Emmanuel Dezzery, Thierry Fournier, Sophie Gallé-Soas, Éric Gourgoulhon, René Habert, Anne Masé, Laurence Plérat, David Quéré, Lin Shao, Johannes Steiger, Frédéric Thomas.

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

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

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Canada : Edipresse [illegible] Québec, H3N 1V3 Canada.
Suisse : Servidis, Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Casterman : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

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

PRESSE PAYANTE 2010



# Un monde d'ondes

Les ondes ? Des ronds qui se propagent à la surface lisse de l'étang où l'on a jeté un petit caillou, ou la houle d'une mer déchaînée ; la lumière et les couleurs du soleil couchant ou de l'arc-en-ciel ; les signaux qui permettent d'écouter la radio, de regarder la télévision ou de téléphoner. Ces exemples sont tellement familiers qu'on en oublie l'essence : les ondes. Elles se propagent dans les profondeurs de la Terre – les ondes sismiques –, à sa surface – les ondes des océans –, dans le cosmos – les ondes au cœur des étoiles. Elles se manifestent à courte distance – celle de l'atome – ou à des distances gigantesques dans l'Univers – les ondes gravitationnelles. Le vivant n'est pas exclu, puisque des ondes électriques sont présentes dans le cerveau de toutes les espèces, y compris quand il ne s'agit que d'ébauches de centres nerveux.

Omniprésentes, elles sont également complexes. L'image des ronds dans l'eau qui s'écartent régulièrement du centre où a eu lieu la perturbation est un cas d'école. Dans la réalité, les réverbérations, les interactions, les changements de la profondeur de la mare, la présence de vent, d'obstacles ou de pluie perturbent la belle ordonnance initiale. Et cela s'applique à toutes les ondes, quel que soit le milieu où elles se propagent.

## La complexité devient un atout.

Toutefois, malgré ces difficultés, certaines limites considérées comme infranchissables sont aujourd'hui repoussées. Impossible de focaliser la lumière dans un milieu diffusant, le brouillard par exemple, disait-on. Les physiciens y parviennent désormais. Impossible d'obtenir une résolution meilleure que la demi-longueur d'onde du rayonnement utilisé ! Là encore, les physiciens se jouent de cette limite. Impossible d'extraire des informations du bruit de fond des ondes sismiques. Pourtant, celui dû aux vagues qui se brisent sur les côtes ou aux trains de houle dont la collision se répercute sur le fond, loin d'être parasite, permet aux sismologues de mieux comprendre les humeurs de la Terre et sa structure.

Non seulement la complexité n'est plus un obstacle, mais elle devient un atout. C'est le cas pour une méthode consistant à faire revivre aux ondes le film de leur vie passée. Dans ces conditions, plus le milieu qu'elles traversent est complexe, plus le signal recueilli après l'opération sera précis. Enfin, l'activité globale du cerveau est plus que la simple somme des activités de ses neurones pris individuellement. Un tel phénomène d'émergence sous-tendrait l'apparition de la conscience. La complexité réinterprétée des ondes bouscule les frontières de toute la physique qui nous entoure. Et ces exemples n'étaient qu'une mise en bouche !

# SOMMAIRE


1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
*Didier Nordon*

## Actualités

6 Les neutrinos plus rapides que la lumière ?

7 Le lait de pigeon

7 La naissance en douceur pour les étoiles

10 Les prix Nobel 2011

12 Comment l'amiante perturbe les cellules humaines

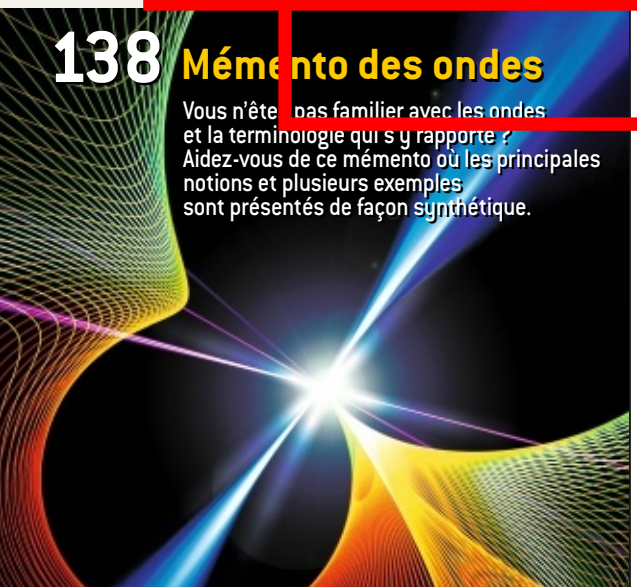
... et bien d'autres sujets.

16 ON EN REPARLE

## Opinions

18 POINT DE VUE
La carte bancaire ne doit pas remplacer la carte *Vitale* !
*André Grimaldi*

20 VRAI OU FAUX
Des douleurs dorsales peuvent-elles être dues à des défauts aux dents ?
*Bénédicte Salthun-Lassalle*


138 Mémento des ondes
Vous n'êtes pas familier avec les ondes et la terminologie qui s'y rapporte ? Aidez-vous de ce mémento où les principales notions et plusieurs exemples sont présentés de façon synthétique.

# L'univers des ONDES

## Quand la physique dépasse ses limites


22 MATHÉMATIQUES
Les ondes, entre physique et mathématiques
*Claude Bardos*

30 PHYSIQUE
La complexité : un atout pour le retournement temporel des ondes
*Mathias Fink*

38 PHYSIQUE
Façonner la lumière pour contrôler la matière
*Béatrice Chatel*

44 IMAGERIE
Voir à travers le brouillard
*Sylvain Gigan*

50 NANOTECHNOLOGIES
Lumière sur l'infiniment petit
*Rémi Carminati et Yannick De Wilde*

58 PHYSIQUE
Les ondes sous l'emprise des métamatériaux
*J. Guenneau, S. Enoch et R. McPhedran*

64 GÉOPHYSIQUE
Ce bruit sismique qui sonde la Terre
*Michel Campillo*


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

72 ASTROPHYSIQUE
**L'astérosismologie : voir battre le cœur des étoiles**
*É. Michel, M. Auvergne et A. Baglin*

84 ASTROPHYSIQUE
**Les ondes gravitationnelles, la bande son de l'Univers**
*Bernard Schutz et Stefano Vitale*

90 MATHÉMATIQUES
**Les vagues en équations**
*David Lannes*

98 PHYSIQUE
**La dualité onde-corpuscule à l'œil nu**
*Emmanuel Fort et Yves Couder*

106 PHYSIQUE
**Des ondes de matière pour tester les lois de l'Univers**
*R. Geiger, V. Ménoret et Ph. Bouyer*

114 PHYSIQUE
**Des ondes de spin pour l'électronique**
*M. Cazayous, Y. Gallais et A. Sacuto*

120 NEUROSCIENCES
**Des ondes dans le cerveau**
*Stéphane Charpier*

128 ÉPIDÉMIOLOGIE
**Champs et ondes : quel impact sur la santé ?**
*Luc Verschaeve et Jacques Vanderstraeten*

134 TÉLÉCOMMUNICATIONS
**Comment on attribue les fréquences**
*Jean-Jacques Gallot*


# Regards


142 HISTOIRE DES SCIENCES
**La victoire posthume de Robert Scott**
*Edward Larson*

Il y a 100 ans, l'explorateur britannique Robert Scott perdait la course à la conquête du pôle Sud. Pourtant, ses découvertes ont joué un rôle majeur dans l'acceptation de la théorie de l'évolution.

146 LOGIQUE & CALCUL
**Les surprises du jeu de pile ou face**
*Jean-Paul Delahaye*

Les erreurs de nos jugements spontanés sont parfois étonnantes. Le hasard créé par les lancers d'une pièce de monnaie en est l'exemple le plus frappant : tout y semble paradoxal.

152 IDÉES DE PHYSIQUE
**Petite goutte deviendra grande**
*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

157 SCIENCE & GASTRONOMIE
**Pour faire des sablés tendres**
*Hervé This*

158 À LIRE



Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage (p. 23 et 136) ; un encart *Sajdar-Universalis*, un encart *Turquie* posé sur la quatrième de couverture de l'édition abonnés France. Une offre d'abonnement *Pour la Science* est disponible en p. 113, ainsi qu'une sélection de livres en p. 97.
En couverture : © Shutterstock/Tiberiu Stan



Rendez-vous sur POUR LA SCIENCE .fr

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

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

www.pourlascience.fr

## LEÇON DE CIVISME

N'ayant pas à parler politique dans ces colonnes, je n'ai pas à critiquer l'abstentionnisme en tant qu'attitude politique. En revanche, je peux – et je dois – le condamner en tant qu'attitude scientifique.

On a en effet le droit de contester l'enjeu politique d'une élection (« C'est blanc bonnet ou bonnet blanc »), on n'a pas le droit de nier son utilité scientifique. Une élection sert à tester la série de sondages qui l'ont précédée. Elle est l'expérience en vraie grandeur, coûteuse donc rare, venant les mettre à l'épreuve. Grâce à elle, les sondeurs corrigent, affinent, améliorent leurs méthodes, et font ainsi progresser la science qui fonde celles-ci : la statistique. S'abstenir, ou, pire encore, ne pas s'inscrire sur les listes, revient à priver la recherche de données expérimentales dont elle a grand besoin.

Voter est un devoir scientifique.

## IL N'Y A PLUS D'APRÈS...

Une idée profonde, en sciences, établit un lien entre des phénomènes apparemment hétérogènes. Dans le domaine psychologique et social, elle établit un lien entre des comportements apparemment hétérogènes.

Ainsi, l'idée que nous sommes promis à mourir est profonde. Qu'elle soit banale n'y change rien. Jouissant d'une ubiquité universelle, elle découvre une origine commune aux projets humains les plus dissemblables.

Profonde aussi, cette remarque de Valéry : « Ce que tu fais le mieux, cela est un piège inévitable » *(Tel Quel)*. Elle rend compte d'attitudes très diverses, depuis l'écolier qui aime les matières où il réussit, jusqu'au vieil artiste qui, incapable de se renouveler, s'obstine dans la voie où il a obtenu le plus d'applaudissements.

Une notation de Proust, enfin : « Je démêlai seulement que répéter ce que tout le monde pensait n'était pas en politique une marque d'infériorité mais de supériorité » *(À l'ombre des jeunes filles en fleurs)*. Voilà qui explique pourquoi tant de participants à tant de débats expriment avec tant de véhémence des positions tant de fois exprimées avant eux !

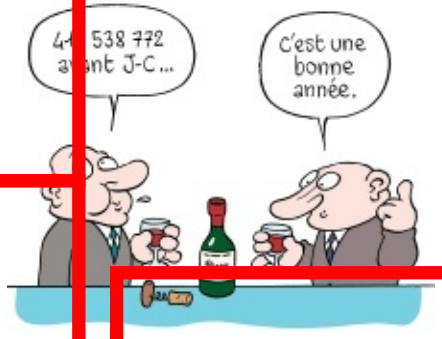
Toutefois, aujourd'hui comme au temps de Valéry, chacun continue à être prisonnier de ses succès et, comme au temps de Proust, le psittacisme triomphe. Plus une remarque psychologique ou sociologique est profonde, dirait-on, moins elle modifie les choses. Elle dévoile l'inéluctable et l'éternel, approche l'essentiel, fait prendre conscience de réactions vitales intimes sur lesquelles l'individu n'a pas prise, détecte des mouvements que la société n'a pas la force de dévier.

En sciences, au contraire, les idées profondes ont des effets énormes : on ne vit pas dans le même monde avant et après Newton, avant et après Einstein. Une idée scientifique profonde bouleverse la société, une remarque psychologique ou sociologique profonde la laisse intacte !

## UN VIN AMEUX MÉGASIME !

Combien de temps faut-il laisser vieillir un vin avant de le boire ? S'il s'agit d'un vin d'Anjou, comptez 400 à 500 millions d'années. Pour un bordeaux, 20 à 40 millions d'années suffiront.

À repenser aux aventures connues par le sol d'où provient le vin qu'il est en train de boire, le géologue Charles Frankel connaît des sensations rares. Lorsqu'il débouche une blanquette de Limoux, il se plaît à « voir monter dans les colonnes de bulles le soupir des derniers dinosaures français », car le grignotable de Limoux pousse parmi leurs fossiles. Quand il savoure un sancerre pour accompagner des huîtres, il songe aux ancêtres de ces dernières : leurs fossiles vieux de 150 millions d'années, farcissent précisément la couche marneuse où se cultive le sancerre.




Les vins qui ont exigé la plus longue maturation sont ceux d'Anjou : il a fallu la disparition d'un océan pour qu'ils voient le jour. En effet, un océan séparait le Nord et le Sud de l'actuelle France. Une collision entre plaques tectoniques l'a supprimé, broyant et surélevant une pâte de sédiments et de roches volcaniques où les vignes prospèrent aujourd'hui, c'est-à-dire 400 millions d'années plus tard. « Lorsque vous portez à vos lèvres un vin d'Anjou, c'est l'arôme de cette mer disparue qui se rappelle à votre souvenir, ce grand carambolage qui a donné naissance à la France. »

Les vins qui ont demandé le moins de temps sont ceux du Bordelais. Ils sont produits sur un environnement géologique vieux


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

de quelques dizaines de millions d'années seulement. La valeur n'attend pas le nombre des années ! (D'après Charles Frankel, *Terre de vignes*, Seuil, 2011.)

## PAUVRE VÉRITÉ

Souhaitons que, parmi les personnes impliquées dans le fonctionnement de la justice, aucune n'ait pour préoccupation exclusive de voir établie la vérité des faits !

Qui, en effet, a un intérêt primordial à ce que la vérité perce ? Sûrement pas les malfrats, qui cherchent au contraire à empêcher la justice de faire la lumière sur leurs activités. Les avocats, eux, privilégient la défense de leur client. Iraient-ils révéler quelque fait vrai, mais compromettant pour lui ? Pas si fous ! Lorsqu'ils sont partie prenante d'une affaire médiatique, leurs interventions dans la presse sont souvent des injures à la notion non seulement de vérité, mais même de simple recherche de la vérité.

Quant aux magistrats, ils sont pris dans une hiérarchie, ont des soucis de carrière, sont en butte aux exigences de l'opinion publique : il leur faut une vertu rare pour faire primer coûte que coûte la recherche de la vérité.

Finalement, les seuls à n'avoir d'autre désir que la manifestation de la vérité sont ceux que la justice soupçonne à tort. Voilà pourquoi il faut souhaiter que, parmi les personnes prises dans le cours de la justice, aucune n'ait pour intérêt unique de faire éclater la vérité. ■

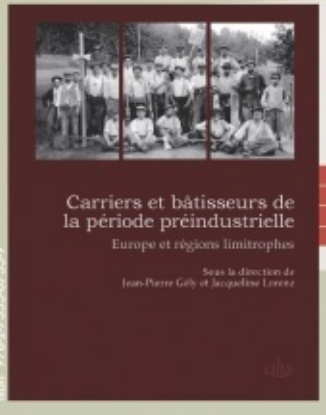
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

CTHS Géographie n° 9

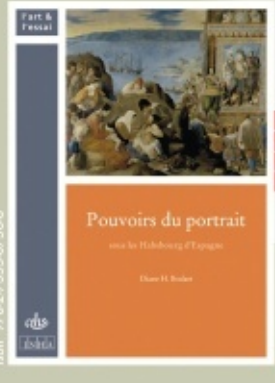
Imaginaires des Sahariens
Habiter le paysage
Anne-Marie Frérot
181 pages
ill. noir et blanc
21,5 x 26 cm
35 €

CTHS Sciences n° 11




Carriers et bâtisseurs de la période préindustrielle : Europe et régions limitrophes
Jean-Pierrre Gély
et Jacqueline Lorenz (dir.)
312 pages
ill. noir et blanc
21 x 27 cm
35 €

L'art & l'essai n° 10



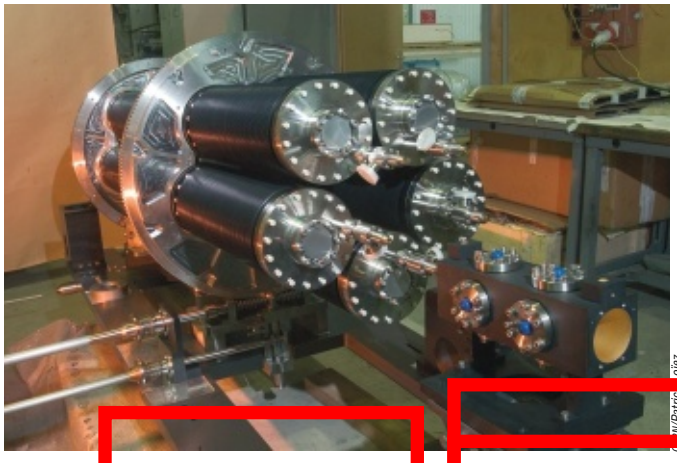

Pouvoirs du portrait
sous les Habsbourg d'Espagne
Diane H. Bodart
590 pages
ill. couleur et noir et blanc
16,5 x 22 cm
46 €

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

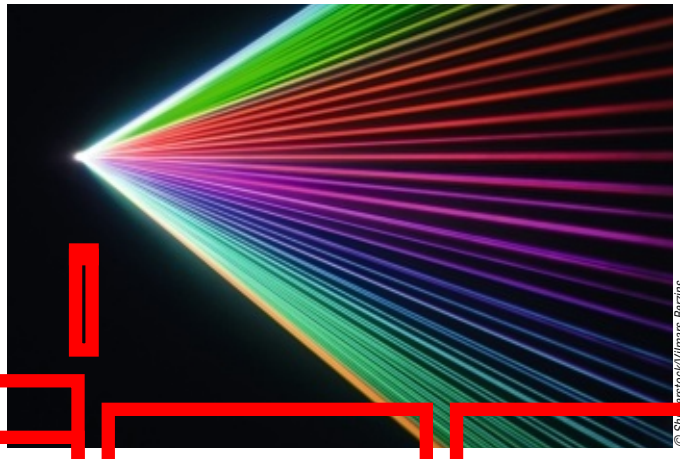
Physique

# Des neutrinos plus rapides que la lumière ?

**L'équipe de l'expérience internationale OPERA, en Italie, a mesuré la vitesse des neutrinos avec une précision suffisante pour affirmer qu'elle est légèrement supérieure à celle de la lumière. Un résultat inattendu qui, s'il se confirme, fera l'effet d'une bombe en physique fondamentale.**



© CERN/Patrick Loïez



© Shutterstock/Vilmars Berzins

Au CERN, la cible sur laquelle des protons accélérés par la machine SPS viennent frapper est constituée d'une série de cylindres en graphite, longs de dix centimètres et disposés sur deux mètres de longueur *(ci-dessus)*. Les collisions produisent notamment des mésons π et K, dont la désintégration fournit les neutrinos muoniques traqués 730 kilomètres plus loin par les physiciens d'OPERA, au Laboratoire de Gran Sasso en Italie. Selon ces derniers, la vitesse des neutrinos serait supérieure d'environ six kilomètres par seconde à celle de la lumière.

Au Laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie, l'expérience OPERA étudie depuis plusieurs années un faisceau de neutrinos muoniques produit par l'accélérateur SPS du CERN, à 730 kilomètres de là. Le faisceau est engendré par l'impact de protons accélérés sur une cible de graphite ; les chocs créent des particules instables, notamment des mésons π et K qui se désintègrent chacun en un muon et un neutrino muonique. Les neutrinos ainsi engendrés traversent la croûte terrestre en ligne droite jusqu'au détecteur d'OPERA.

En mesurant précisément la distance que le faisceau doit parcourir et le temps écoulé entre la production des neutrinos et leur détection, les physiciens ont obtenu ce résultat très étonnant : les neutrinos effectuent leur trajet en 60 nanosecondes de moins que ne le ferait la lumière pour la même distance dans le vide, la durée de ce parcours de 730 kilomètres étant de 2,4 millisecondes. En d'autres termes, sur une course de 730 kilomètres entre neutrinos et photons, les neutrinos gagneraient avec 20 mètres d'avance environ.

Ce résultat est ahurissant, car il va à l'encontre de tout ce que nous ont appris la physique expérimentale et la physique théorique depuis plus d'un siècle. En effet, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, née en 1905, fait apparaître la vitesse de la lumière dans le vide (un peu moins de 300 000 kilomètres par seconde) comme une constante absolue (indépendante de l'état de mouvement de l'observateur) et infranchissable. Et depuis 1905, cette théorie a été confirmée dans ses différents aspects par d'innombrables expériences. Elle fait partie intégrante de tout l'édifice théorique de la physique fondamentale. Il est donc impossible de la contester à la légère et sans proposer une alternative capable de rendre compte d'un siècle de résultats expérimentaux.

L'équipe des chercheurs d'OPERA, menée par Dario Autiero, physicien du CNRS à l'Institut de physique nucléaire de Lyon, a donc été prudente avant de rendre publics ses résultats. Ses données ont été recueillies sur les trois dernières années, ce qui représente plus de 16 000 neutrinos détectés. Les physiciens ont fait et refait leurs calculs, mesuré par géodésie la distance parcourue par le faisceau de neutrinos à 20 centimètres près, déterminé la durée du parcours à moins de 15 nanosecondes près, etc.

Pour l'écart relatif $(v-c)/c$ de la vitesse $v$ des neutrinos par rapport à celle ($c$) de la lumière, l'équipe d'OPERA obtient la valeur $(2{,}48 \pm 0{,}58) \times 10^{-5}$, ce qui correspond à une vitesse des neutrinos qui dépasse celle de la lumière d'environ six kilomètres par seconde.

Il suggère maintenant, pour la communauté de la physique des hautes énergies, d'essayer de confirmer ou d'infirmer ce résultat par d'autres analyses ou d'autres expériences et, pour les théoriciens, d'essayer de voir comment une vitesse supérieure à la lumière pourrait être intégrée à une théorie cohérente. Les hypothèses pour faire rentrer les neutrinos dans le rang n'ont pas encore convaincu.

→ Maurice Mashaal

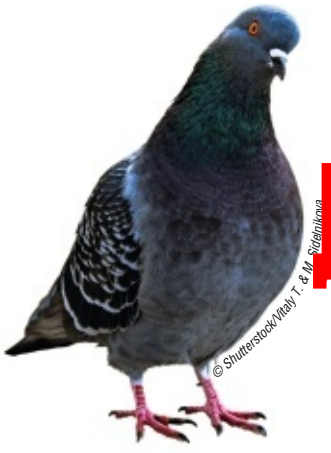
*T. Adam et al., prépublication (http://arxiv.org/abs/1109.4897), 22 septembre 2011*



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Biologie

# Le lait des pigeons


© Shutterstock/Vitaly T. & M. Sidelnikova

Les mammifères ne sont pas les seuls à produire du lait. C'est aussi le cas de certains oiseaux, notamment les pigeons. Meagan Gillespie, de l'Université Deakin, à Geelong, en Australie, et ses collègues ont précisé les mécanismes de cette lactation.

La substance est fabriquée dans le jabot, un renflement de l'œsophage, par des cellules dites épithéliales qui tapissent l'organe. Ce lait de jabot, riche en protéines et en lipides, se distingue du lait des mammifères par l'absence de glucides. Autre différence, il est produit aussi bien par les mâles que les femelles.

Les biologistes ont montré que le jabot des pigeons allaitant est plus volumineux et plus épais que celui d'oiseaux non allaitant. Il est aussi flanqué de deux lobes latéraux qui contiennent le lait. De plus, les cellules épithéliales sont plus nombreuses et forment des couches replissées, augmentant la surface de production du lait. Une analyse génétique a révélé que chez les pigeons allaitant, de nombreux gènes sont surexprimés, notamment ceux favorisant la croissance cellulaire, la production d'antioxydants et le système immunitaire.

➜ Loïc Mangin

*M. Gillespie et al., BMC Genomics, à paraître, 2011*

Astrophysique

# Naissance en douceur pour les étoiles

Comment les populations d'étoiles se forment-elles dans les galaxies ? Pour le préciser, D. Elbaz et son équipe ont examiné la relation entre deux grandeurs dans un échantillon de milliers de galaxies observées par le satellite infrarouge *Herschel*, dont les plus lointaines se montrent telles qu'elles étaient il y a 11 milliards d'années. La première de ces grandeurs est l'émission infrarouge totale d'une galaxie, qui permet d'évaluer le taux de formation d'étoiles en son sein.

La seconde est l'émission infrarouge autour de huit micromètres de longueur d'onde. Elle rend compte de la quantité de grains de poussière riches en carbone, des molécules d'hydrocarbure aromatique polycyclique (PAH) présents dans le milieu interstellaire. Or les PAH sont sensibles à la façon dont se forment les étoiles.

Ainsi, lors d'une collision de galaxies, des flambées de formation d'étoiles se produisent dans des régions très localisées. Elles s'accompagnent d'une émission importante de rayonnement ultraviolet, qui détruit les PAH, dont l'émission à huit micromètres se trouve donc amoindrie. À l'inverse, lorsque des étoiles sont créées par des processus moins violents que les collisions galactiques, leur formation est répartie dans toute leur galaxie hôte. Le flux d'ultraviolets est alors faible, donc les PAH sont moins détruites et leur émission à huit micromètres est plus intense.

C'est justement ce qu'ont observé les astronomes. D'après la comparaison de l'émission infrarouge totale des galaxies à leur émission à huit micromètres, il apparaît que seules 20 pour cent de celles ayant formé des étoiles au cours des 11 derniers milliards d'années semblent devoir leur fertilité à des collisions.

© ESA-AOES Medialab

Vue d'artiste d'une galaxie accrétant du gaz froid. Ce flux continu de matière favoriserait la formation stellaire douce.

Quels sont alors les processus plus calmes qui entraîneraient la formation d'étoiles dans les galaxies ? Il pourrait s'agir de courants de gaz froid tombant sur les galaxies et y apportant la matière nécessaire à la formation stellaire, mais la question reste ouverte.

➜ Stéphane Fay

*D. Elbaz, et al., Astronomy & Astrophysics, vol. 533, A119, 2011*

## En bref

### UN GÈNE MANIPULATEUR

La chenille du bombyx infectée par des baculovirus grimpe en haut des arbres, où elle meurt et se liquéfie : les virus qu'elle abritait se répandent et contaminent alors de nouvelles larves. Des biologistes de l'Université d'État de Pennsylvanie ont découvert pour la première fois un gène du virus parasite, nommé *egt*, qui lui permet d'effectuer ce contrôle. Quand ils ont supprimé ce gène des virus parasitant les chenilles, ils ont constaté que celles-ci ne grimpent plus aux arbres et ne meurent pas.

### RÉAPPARITION DE RÉCIFS

Après leur disparition lors de la crise Permien-Trias, les récifs océaniques sont réapparus rapidement au début de l'ère secondaire. En effet, des géologues ont collecté de nombreux fossiles d'éponges, associés avec des annélides, des gastéropodes et d'autres organismes benthiques dans des roches datées du Trias inférieur. Leur étude a révélé que les récifs d'animaux sont réapparus en 1,5 million d'années seulement, ce qui est cinq fois plus rapide qu'[illegible]

### ESCARGOTS VOLANTS

Des escargots marins ont traversé l'Amérique centrale… en volant. En étudiant la phylogénie des variations de gènes mitochondriaux de deux espèces voisines, l'une de la côte pacifique, l'autre de la côte atlantique, des biologistes de Panama se sont aperçus que des échanges de matériel génétique entre ces côtes avaient eu lieu à deux reprises après la formation de l'isthme de Panama. Les escargots auraient traversé la langue de terre… dans l'estomac d'oiseaux migrateurs.

Planétologie

# Mars sursaturée en vapeur d'eau

On a trouvé de l'eau sur Mars. Du moins… dans son atmosphère! Luca Maltagliati et ses collègues du Laboratoire Atmosphères, milieux, observations spatiales (LATMOS), et d'autres ont mis en évidence grâce aux données de la sonde européenne *Mars Express* que l'atmosphère martienne est sursaturée en vapeur d'eau.

L'atmosphère est saturée lorsqu'elle contient autant d'eau sous forme de vapeur que l'autorisent la température et la pression, l'excédent se condensant en gouttelettes. Si la condensation est bloquée, l'eau excédentaire persiste sous forme de vapeur et l'atmosphère est alors « sursaturée ».

Si l'on sait depuis longtemps que de la vapeur d'eau est présente dans l'atmosphère martienne – en quantité, 10 000 fois moins que sur Terre –, les modèles supposaient que la sursaturation n'y existait pas. La concentration en eau en fonction de l'altitude et de la température n'avait en effet été étudiée que de façon parcellaire.

L. Maltagliati et ses collègues ont comblé cette lacune, en couplant des relevés effectués durant deux saisons par deux instruments de la sonde *Mars Express* : le spectromètre à haute résolution SPICAM, qui révèle la présence des différents éléments chimiques, et le spectromètre infrarouge MCS, qui livre instantanément la température. Les chercheurs ont ainsi découvert que l'atmosphère martienne est souvent sursaturée en vapeur d'eau entre 20 et 50 kilomètres d'altitude, et que le taux de sursaturation peut atteindre dix fois ceux observés sur Terre!

Ce résultat suggère un manque de poussières à ces altitudes, qui bloque la condensation. Il expliquerait aussi pourquoi la couverture nuageuse est sous-estimée par les modèles climatiques martiens : il y a dans l'atmosphère 10 à 100 fois plus d'eau disponible que prévu pour former des nuages.

Philippe Pilleri, Génie

*L. Maltagliati, et al., Science, 30 septembre 2011*

© Nikimedia Commons

L'atmosphère intermédiaire de Mars contient jusqu'à 100 fois plus d'eau qu'admis jusqu'à présent.

**1 120**, c'est le nombre de protéines que coderait le génome de *Megavirus chilensis*, un virus géant récemment découvert. Il détrône ainsi *Mimivirus* et ses 979 protéines.

Comportement

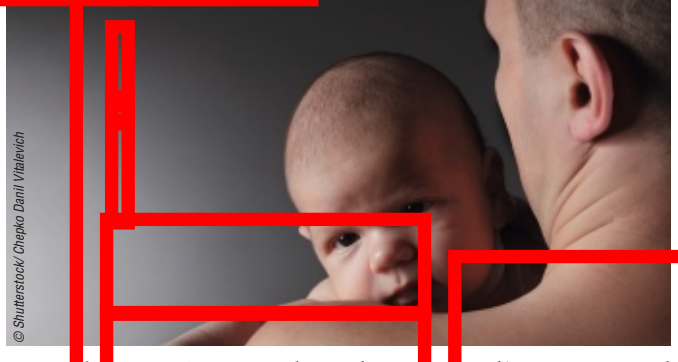
# La paternité fait baisser la testostérone

La testostérone est l'hormone sexuelle mâle par excellence, sécrétée surtout par les testicules et dans une moindre mesure par les glandes surrénales. Elle favorise une augmentation de la force et de la masse musculaire, et est associée aux comportements agressifs, dominateurs et sexuels. Chez l'homme, on constate une sécrétion moindre de testostérone chez les jeunes pères.

Mais l'explication restait controversée : les hommes ayant moins de testostérone ont-ils plus de chance d'avoir des enfants, ou est-ce parce qu'ils deviennent pères que leur concentration en testostérone diminue? Lee Gettler, de l'Université Northwestern de l'Illinois, et ses collègues ont montré que c'est la paternité qui diminue la sécrétion de testostérone.

Aux Philippines, les scientifiques ont mesuré la concentration de testostérone dans la salive de 624 hommes célibataires et ont suivi ces sujets pendant quatre ans et demi (de 2005 à 2009). Environ un tiers des participants ont débuté une relation amoureuse stable durant cette période et sont devenus pères pour la première fois.

Dès que ces hommes devenaient pères, ils sécrétaient environ 30 pour cent de testostérone en moins. Et cette diminution était d'autant plus importante que la durée des soins paternels prodigués au nourrisson et à l'enfant était plus longue ; les participants s'occupant de leur enfant plus de trois heures par jour sécrétaient moins de testostérone que les autres pères moins présents.



© Shutterstock/ Chepko Danil Vitalevich

La chute de la testostérone est donc liée au fait de s'occuper d'un enfant. Cette baisse favoriserait la relation père-enfant. À l'instar de l'instinct maternel qui présente de nombreuses modifications hormonales quand une femme devient mère, l'instinct paternel a-t-il un ancrage hormonal? Quoi qu'il en soit, on voit que la biologie d'un homme peut changer pour répondre aux exigences de la paternité.

➔ Bénédicte Salthun-Lassalle

*L. Gettler et al., PNAS, en ligne le 12 septembre 2011*



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# OFFREZ LES CLÉS DE LA SCIENCE !

## À LA DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

**Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique**

**Neil COMINS**

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

**568 pages - 49 € - Novembre 2011**

## VERS LA FIN DES DÉCOUVERTES

**Approchons-nous des limites de la science ?**

**Russell STANNARD**

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

**168 pages - 19 € - Août 2011**

## COMMENT PENSER COMME UN MATHÉMATICIEN

**Comprendre, expliquer et étudier**

**Kevin HOUSTON**

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

**306 pages - 22 € - Juin 2011**

En librairie et sur www.deboeck.com

de boeck

Prix Nobel de chimie

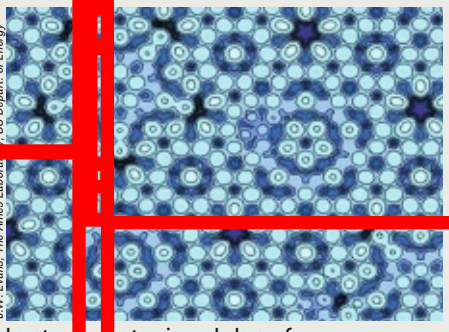
# Les quasi-cristaux

Le prix Nobel de chimie a été attribué à Daniel Shechtman, pour la découverte des quasi-cristaux. À la fin du XVIIIe siècle, le Français René Just Haüy proposa que, dans un cristal, les atomes sont disposés selon un motif simple (une maille unitaire), qui se répète de façon périodique dans le matériau. Cette répétition périodique devint la condition *sine qua non* de l'existence des cristaux. Or pour qu'un ordre à petite échelle puisse se retrouver à grande échelle, celle du cristal, la maille doit obéir à des règles de symétrie qui autorisent le pavage de l'espace.

Voyons cela dans le cas simple à deux dimensions. Avec des triangles équilatéraux (symétrie d'ordre 3), des carrés (ordre 4) ou des hexagones (ordre 6), on peut paver le plan. En revanche, avec des polygones à cinq ou sept côtés, ou plus, c'est impossible. De même, dans l'espace, des mailles de symétrie d'ordre 5, 7 ou plus ne peuvent s'agencer en un cristal.

Pourtant, le matin du 8 avril 1982, au Technion, à Haïfa en Israël, D. Shechtman fait une découverte qui contredit cette idée. En étudiant la diffraction des électrons par un alliage d'aluminium et de manganèse refroidi rapidement, il obtient une figure typique des cristaux (une constellation de points brillants), révélant une symétrie d'ordre 10. Le cristal observé était donc interdit par la théorie! Après une longue controverse, ces étonnants résultats furent acceptés, mais il restait à comprendre comment sont organisés les atomes dans ce que l'on nomme depuis lors un quasi-cristal.

La solution vint des mathématiciens qui étudiaient des façons de paver le plan sans recourir à des répétitions d'un même motif. Au milieu des années 1970, le Britannique Roger Penrose proposa une solution simple à l'aide de deux losanges, l'un étroit et l'autre plus large. Ce pavage non périodique intrigua le cristallographe Alan Mackay qui imagina un assemblage d'atomes conforme à cette structure: la figure de diffraction qu'il obtint à partir de son modèle avait une symétrie d'ordre 10! On comprit alors qu'un quasi-cristal est un assemblage d'atomes ordonné, mais non périodique. C'est cette découverte qui vient d'être couronnée par le comité Nobel. Étonnamment, certaines mosaïques de l'art islamique médiéval,



J.W. Evans, The Ames Laboratory, US Depart. of Energy

La structure atomique de la surface d'un quasi-cristal composé d'aluminium, palladium et manganèse. Les quasi-cristaux ont une symétrie spatiale qui est interdite pour des cristaux parfaits.

par exemple à l'Alhambra, à Grenade, en Espagne, sont fondées sur cette non-périodicité. Cette propriété a longtemps été l'apanage de matériaux produits en laboratoire, mais en 2007, le premier quasi-cristal «naturel» a été découvert dans les montagnes de Koriakie, en Russie.

➔ L. M.

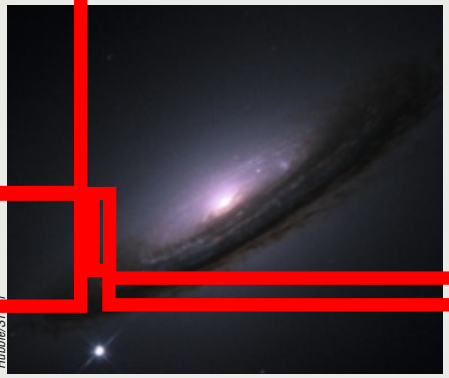
Prix Nobel de physique

# L'accélération de l'expansion de l'Univers

Le prix Nobel de physique a été attribué à Saul Perlmutter, responsable du *Supernova Cosmology Project*, ainsi qu'à Adam Riess et Brian Schmidt, responsables de l'équipe *High-Z Supernovae Search* pour avoir mis en évidence l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Le modèle cosmologique du Big Bang est fondé entre autres sur l'observation que l'Univers est en expansion: les galaxies s'éloignent les unes des autres dans toutes les directions, et ce d'autant plus vite qu'elles sont éloignées. On pensait initialement qu'en raison de la présence de matière, l'expansion aurait dû ralentir. Mais en 1998, alors qu'ils étudiaient les supernovae lointaines pour préciser la valeur du taux d'expansion, ou constante de Hubble, les lauréats ont découvert que le rythme auquel l'Univers se dilate accélère.

Pour évaluer la vitesse d'expansion de l'Univers, les cosmologistes utilisent des explosions d'étoiles particulières, les supernovae de type I*a*, qualifiées de «chandelles standards». On peut en effet connaître facilement leur luminosité intrinsèque, et donc en déduire leur éloignement à partir de la luminosité apparente. On peut par ailleurs mesurer le décalage vers le rouge de ces supernovae, c'est-à-dire l'étirement de la longueur d'onde de la lumière émise durant son trajet, sous l'effet de l'expansion cosmique. En comparant ces deux données, on estime le taux d'expansion au fil du temps.



Hubble/STScI

La supernova SN 1994D dans la galaxie NGC 4526.

Dans les données obtenues par S. Perlmutter, A. Riess et B. Schmidt, les supernovae les plus lointaines étaient moins brillantes, c'est-à-dire plus éloignées que ne le laissait supposer leur décalage vers le rouge. En d'autres termes, le cosmos s'est dilaté plus vite depuis l'époque où ces supernovae ont explosé que si le taux d'expansion avait été constant: l'expansion accélère. Ce résultat a depuis été confirmé par d'autres mesures, plus précises, ainsi que par des observations indépendantes, par exemple celle du rayonnement de fond cosmologique, en micro-ondes. Pour expliquer cette accélération, les cosmologistes ont été contraints d'introduire une forme d'énergie de densité constante qui représente plus de 70 pour cent du contenu de l'Univers et dont les effets contrecarrent la gravitation: l'énergie sombre. Sa nature, encore inconnue, est aujourd'hui une question centrale de la cosmologie.

➔ Ph. R.-G.

Prix Nobel de physiologie-médecine

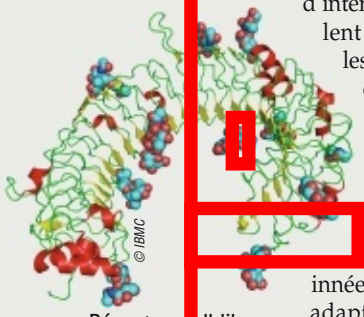
# Le système immunitaire

L'activation de l'immunité, qu'elle soit innée ou acquise, a été récompensée par le comité Nobel. Un Français, Jules Hoffmann, figure au palmarès. J. Hoffmann, l'Américain Bruce Beutler et le Canadien Ralph Steinman ont été récompensés pour avoir « révolutionné notre compréhension du système immunitaire en découvrant les principes clés de son activation ». Les deux premiers se sont intéressés à l'activation du système immunitaire inné, et le dernier, décédé quelques jours avant l'annonce du prix, au rôle des cellules dendritiques dans le système immunitaire adaptatif.

Les deux types d'immunité, innée et adaptative, constituent les défenses des mammifères contre les micro-organismes pathogènes. La première est opérationnelle rapidement, mais n'est pas spécifique. La seconde, plus lente à se mettre en place, nécessite l'intervention de lymphocytes qui produisent des anticorps et détruisent les cellules infectées. En outre, l'immunité adaptative conserve la « mémoire » des intrus, évitant une nouvelle infection par les mêmes pathogènes.

Et les mammifères ne sont pas les seuls concernés ! En 1996, J. Hoffmann mettait en évidence chez la drosophile le rôle de molécules (les récepteurs Toll) dans la reconnaissance des agents fongiques. Lorsqu'ils sont activés, ces récepteurs, insérés dans la membrane des cellules, entraînent une cascade de réactions qui aboutissent à la production de molécules... antifongiques ! Quand l'agent pathogène est une bactérie, c'est un peptide bactéricide qui est produit par l'insecte. Aujourd'hui, on connaît une vingtaine de peptides antimicrobiens synthétisés par la drosophile.

De son côté, B. Beutler identifia chez des souris un récepteur semblable aux récepteurs Toll des mouches. La cascade de réactions qui suit l'activation de ce récepteur aboutit à la fabrication d'interleukines, des molécules qui stimulent les acteurs de l'immunité. Ainsi, les mécanismes de l'immunité innée des vertébrés partagent de nombreuses analogies avec ceux de la mouche. Autre point commun, certains peptides antimicrobiens de la drosophile ont été retrouvés chez les mammifères, dont l'homme.



Récepteur Toll-like TLR3 humain

Chez les mammifères, l'immunité innée est complétée par une immunité adaptative. Les cellules dendritiques, mises en évidence par Steinman en 1973, font le lien entre les deux systèmes. En maraude dans le sang, la peau et divers tissus, les cellules dendritiques jouent le rôle de sentinelles, à l'affût des intrus. Dès qu'il en présente un, elles le détectent, l'ingèrent et le digèrent pour en présenter ensuite des morceaux (on parle d'antigènes) à leur surface. Après avoir migré vers les ganglions, elles déclenchent l'activation des cellules de l'immunité adaptative, notamment les lymphocytes T et B qui apprennent à reconnaître ces antigènes spécifiques et à cibler leurs attaques contre le pathogène qui les porte.

Ces travaux se sont traduits par diverses applications visant à traiter et à prévenir certaines maladies.

➔ L. M.

Géologie

# Les rivières et les arbres ont coévolué

Les rivières présentent des tracés variés, plus ou moins stables : un unique chenal rectiligne ou sinueux, ou des chenaux multiples entourant des bancs de sable, de graviers ou des îles végétalisées. Neil Davies et Martin Gibling, de l'Université Dalhousie à Halifax, au Canada, ont montré que les rivières à chenaux stables sont apparues et se sont développées au cours du Dévonien (entre 395 et 345 millions d'années), ce qui coïncide avec l'apparition et l'expansion des arbres. Ces derniers sont apparus il y a environ 375 millions d'années. Or, dans les sédiments fluviatiles datés du Carbonifère (entre 345 et 200 millions d'années), les géologues ont trouvé davantage de débris de bois que dans les sédiments plus anciens. Ils en déduisent que le développement des arbres a favorisé la stabilisation des rivières.

➔ Cécile Fourrage

*N. S. Davies et M. R. Gibling, Nature Geoscience, vol. 3, pp. 629-633, 2011*

Les rivières à méandres, ici en Chine, ont un tracé sinueux. La végétation contribue à leur stabilité.

Neurobiologie

# Cerveau et fertilité

Les troubles de la reproduction ne cessent d'augmenter et les experts pensent que l'infertilité aura doublé d'ici dix ans. Vincent Prévot et ses collègues, du Centre de recherche Jean Pierre Aubert, à Lille (Unité Inserm 837), ont découvert un nouvel acteur de la « fonction de reproduction » : des cellules gliales (des cellules cérébrales qui ne sont pas des neurones) nommées astrocytes.

À la puberté, certains neurones de l'hypothalamus, un noyau cérébral, s'activent et libèrent l'hormone GnRH ; cette dernière favorise la sécrétion par l'hypophyse de deux hormones sexuelles, qui stimulent la croissance des organes sexuels secondaires et assurent toute la vie la fonction reproductive. Les neuroscientifiques ont montré qu'une autre hormone, la prostaglandine E2, est indispensable à l'activité électrique des neurones à GnRH. Or cette hormone est un « gliotransmetteur » : elle est produite par les astrocytes situés près des neurones. Les souris dont les astrocytes sécrètent moins de prostaglandine E2 présentent un retard de puberté et leurs neurones à GnRH sont inactifs. Les astrocytes pourraient représenter une nouvelle cible thérapeutique des troubles centraux de la fertilité.

➔ [illegible]

*J. Clasadonte et al., PNAS, vol. 108, pp. 16104-16109, 20 septembre 2011*

Biologie

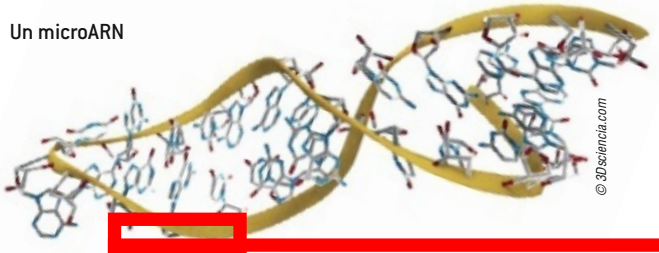
# Du végétal dans l'animal

Quelle est la différence entre un animal et un végétal ? La réponse n'est pas simple et l'équipe de Lin Zhang, de l'Université de Nanjing, en Chine, a mis au jour un phénomène qui brouille encore les lignes. Les microARN sont des petits ARN non codants, petits car ils sont constitués d'au maximum 24 nucléotides et non codants, car ils ne sont pas traduits en protéines, à l'inverse des ARN messagers. Le rôle des microARN est de contrôler la traduction de ces ARN messagers en s'y associant, ce qui conduit à leur destruction. Dans du sang et des tissus humains, les biologistes ont identifié un microARN (MIR168a) qui a une origine... végétale ! Il est donc apporté par la nourriture. Plus encore, ce microARN est actif chez la souris et l'être humain : il se lie à l'ARN messager de la protéine LDLRAP1, et en réduit l'expression dans les cellules du foie. Or cette protéine participe à la capture des LDL (lipoprotéines de basse densité) dans le sang. En conséquence, le cholestérol s'accumule dans les vaisseaux, favorisant l'athérosclérose. Outre de la matière, nous mangeons donc aussi de l'information !

→ L. M.

*L. Zhang et al., Cell Research, prépublication en ligne, 2011*

Un microARN




Physique

# Une surface inspirée des plantes carnivores

Les pièges des plantes carnivores *Nepenthes* sont très efficaces : tout insecte qui se pose sur leur surface glisse inévitablement vers l'intérieur, où il sera digéré. Ayant constaté la présence d'un film aqueux à la surface des feuilles, Joanna Aizenberg et ses collègues, de l'Université Harvard aux États-Unis, ont « copié » ce type de piège. Ils ont mis au point une surface glissante capable de repousser tout type de fluide en imbibant un support poreux (des nanofibres de téflon) d'un liquide lubrifiant à faible tension de surface (de la famille de perfluorocarbures). L'ensemble forme un matériau solide-liquide stable, dont la surface repousse les fluides aqueux, mais aussi organiques, tels l'huile, le sang, etc. De surcroît, ces surfaces résistent au gel, à une élévation de la pression et sont capables de s'autoréparer. Ces surfaces, qualifiées d'omniphobes, ont des applications potentielles dans le domaine biomédical, le transport de carburant, les systèmes antigels et les peintures antisalissures.

→ C. F.

*Tak-Sing Wong et al., Nature, vol. 477, pp. 443-447, 2011*

Biophysique

# Comment l'amiante perturbe les cellules humaines

Si l'on sait depuis plusieurs décennies que l'amiante est toxique pour certains types de cellules humaines, le mécanisme de cette toxicité reste à préciser. Des biophysiciens de l'Université Brown, à Rhode Island aux États-Unis, viennent d'apporter des éléments dans ce sens. De plusieurs dizaines de nanomètres de diamètre et plusieurs centaines de micromètres de long, les fibres d'amiante se mêlent aux poussières. Inhalées, elles se déposent dans les alvéoles pulmonaires, et entraînent de graves maladies respiratoires, tels des cancers du poumon et de la plèvre.

Plusieurs équipes avaient déjà observé en microscopie optique que, placés au contact de cellules, des nanotubes de carbone s'introduisent par une extrémité dans les cellules et y restent « plantés ». En étudiant ce phénomène par microscopie électronique à balayage avec des cellules mésothéliales humaines (de telles cellules tapissent la plèvre dans les poumons), Xinghua Shi et ses collègues se sont aperçus que les cellules « confondent » ces nanotubes avec des particules sphériques nanométriques. Voyons pourquoi.

Au contact d'une particule sphérique, la cellule enclenche l'endocytose, un mécanisme qui lui permet d'absorber les molécules nécessaires à son fonctionnement : la membrane cellulaire se creuse autour de la particule – qui adhère à la membrane *via* des récepteurs –, jusqu'à se refermer autour d'elle. De même, la membrane se creuse autour de l'extrémité de fibres d'amiante ou de nanotubes de carbone. Les fibres se redressent alors et commencent à pénétrer dans la cellule.

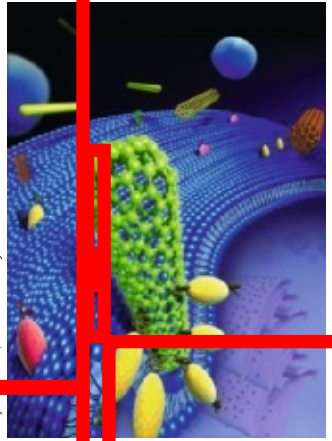
Mais la membrane ne peut se refermer sur les fibres trop longues, et l'endocytose reste bloquée, ce qui perturbe le fonctionnement des cellules. Curieusement, les fibres parallèles à la surface des cellules et celles dont on avait éliminé le bout arrondi ne déclenchaient plus l'endocytose.

À l'aide d'une simulation dynamique, les biophysiciens ont montré que les cellules sont en quelque sorte leurrées par l'extrémité arrondie : lorsque cette dernière touche la membrane, les récepteurs membranaires se regroupent autour de la zone de contact, ce qui redresse le nanotube. La cellule ne « voit » alors que la structure arrondie des semblables aux particules ingérées par endocytose. Sauf que ces particules ne sont pas sphériques.

L'usage de l'amiante est interdit en France depuis 1997, mais des fibres artificielles sont utilisées pour la remplacer dans différents secteurs d'activité. La réglementation de leur utilisation est en cours. Si des [illegible] més, cette question de la forme des extrémités des nanotubes devra être prise en compte.

→ Marie-Neige Cordonnier

*Shi et al., Nature Nanotechnology, publication en ligne, 18 septembre 2011*


Huajian Liu, Brown University

Quand l'extrémité – arrondie – d'une fibre *(en vert)* touche la membrane d'une cellule *(en bleu)*, les récepteurs membranaires *(en jaune)* la redressent. La membrane se creuse, mais la fibre est trop longue pour être absorbée. Elle [illegible] cellule.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

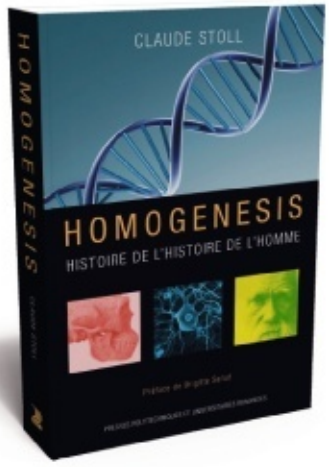
Editeur scientifique de référence depuis 1980

## VIVRE DANS LES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

*Pierre Zweiacker (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne)*

Faut-il craindre les ondes de nos téléphones mobiles et des lignes à haute tension ? Physicien et spécialiste du domaine, Pierre Zweiacker répond ici à ces questions dans un ouvrage accessible à tous.

2009, 152 pages, 15 × 22,5 cm,
ISBN 978-2-88074-811-1



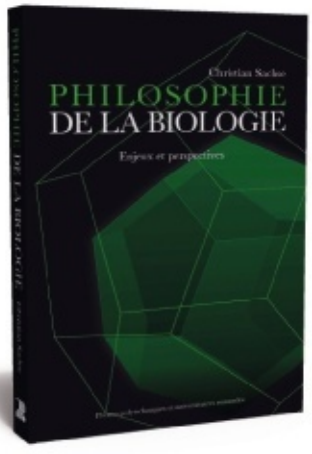

## HOMOGENESIS

**Histoire de l'histoire de l'homme**

*Claude Stoll (Université de Strasbourg)*

Un ouvrage sans équivalent, mettant en perspective passé, présent et avenir de la quête des origines de l'homme; des résultats importants, des scénarios d'hominisation inédits.

2011, 456 pages, 15 × 22,5 cm,
ISBN 978-2-88074-869-2




## PHILOSOPHIE DE LA BIOLOGIE

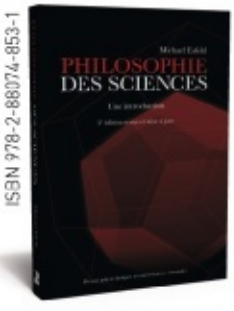
**Enjeux et perspectives**

*Christian Sachse (Université de Lausanne)*

De l'état actuel des connaissances aux questions ouvertes, un panorama complet des débats contemporains en philosophie de la biologie.

2011, 240 pages, 15 × 22,5 cm
ISBN 978-2-88074-926-2

## RENTRÉE 2011: LES INDISPENSABLES



# NOUVEAUTÉS

ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

**www.ppur.org**

Ouvrages disponibles en librairie

Médecine

## Alzheimer et cholestérol

Les causes de la maladie d'Alzheimer sont encore mal comprises. Selon une étude statistique de Kensuke Sasaki et ses collègues, de l'Université de Fukuoka au Japon, la maladie semble plus fréquente chez les personnes ayant une concentration sanguine de cholestérol élevée. Un excès de cholestérol reflète notamment une anomalie du transport de cette molécule dans les cellules. Un tel dysfonctionnement dans les neurones favoriserait la formation des dépôts de protéine bêta-amyloïde systématiquement présents chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Récemment, l'équipe de Lionel Porcar, à l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, a mesuré la vitesse de transport du cholestérol dans des membranes lipidiques modèles, [illegible] ponibles jusqu'alors. La mesure pourrait être utilisée pour diagnostiquer des maladies du [illegible] avant l'hypothèse japonaise ?

➔ C. F.

*T. Matsuzaki et al., Neurology, 2011 ; S. Garg et al., Biophysical Journal, 2011*

Archéologie

## Élites parisii

Nous sommes en 1950, toute la « Gaule » est menacée par l'invasion du labour profond. Toute ? Non ! Un terroir gaulois va subsister à Wissous, aux marges de l'aéroport d'Orly. Appelée récemment pour y mener une fouille de sauvetage, l'équipe de Jean-Philippe Quenez, de l'INRAP, y a découvert un domaine parisii laissé vierge de labour. Comme toutes les élites gauloises, celle des Parisii résidait à la campagne, où elle exploitait champs et troupeaux. Une famille de notables a vécu à Wissous pendant 50 ans au IIe siècle avant notre ère. Ses trois grandes maisons entourées de fossés de trois mètres de profondeur créent une impression d'aisance, que confirment les débris d'amphores et les objets métalliques jetés dans les fossés. Les tessons de poteries et les os de porcs, de bœufs, de chiens et de chevaux consommés racontent la vie quotidienne, une serpette montre que l'on [illegible] fruitiers et une meule que l'on broyait des noix. Des lingots [illegible] taires de fer indiquent que l'on faisait des échanges avec qui passait sur la grande route voisine reliant Lutèce à Orléans.

Françoise Savatier

Astrophysique

## Champs magnétiques intenses dans l'Univers jeune

D'intenses champs magnétiques auraient été engendrés dans l'Univers lors de la formation des premières étoiles. C'est ce que suggèrent les simulations numériques réalisées par Christoph Federrath et Gilles Chabrier, de l'École normale supérieure de Lyon, et leurs collègues. Durant les premières centaines de millions d'années, l'Univers était emplit de plasma. Sous l'action de mouvements dus, par exemple, à l'explosion des premières étoiles en supernovae, ces particules chargées se sont déplacées, et ont engendré par effet dynamo un faible champ magnétique. Celui-ci aurait ensuite été amplifié par la turbulence.

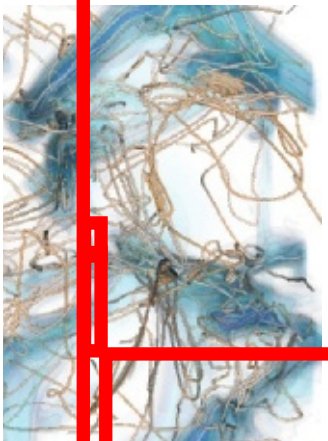
Les chercheurs ont examiné l'influence de la compressibilité du plasma et du mécanisme d'injection d'énergie sur la turbulence. Une faible compressibilité diminue la turbulence, tandis que l'injection d'énergie l'augmente. Ils ont ainsi considéré, dans leurs simulations, des flux de matière dont la vitesse par rapport à celle du son dans le plasma, ou nombre de Mach, varie de 0,02 à 20 (les supernovae peuvent accélérer de la matière jusqu'à Mach 100 !). La matière ainsi éjectée à grande vitesse modifie de façon importante la compression dans le gaz interstellaire et y engendre de la turbulence.

Les chercheurs ont ainsi constaté que les champs magnétiques s'accroissent brusquement quand la turbulence passe d'un régime subsonique à un régime supersonique. En outre, l'effet dynamo est plus efficace si la turbulence déclenche aussi des mouvements de rotation du gaz.

L'existence de très puissants champs magnétiques (à l'échelle astronomique, soit une dizaine de microgauss), [illegible] la présence de plasma magnétisé dans le milieu intergalactique et dans les galaxies.

➔ S. F.

*Ch. Federrath et al, Phys. Rev. Letters, sept. 2011*



Physical Review Letters

**Modélisation du champ magnétique de l'Univers primordial** ***(en orange, les lignes de champ et, en dégradé de bleu, le gaz plus ou moins dense).***

## DERNIÈRE minute ...

**LES DENTS DU RAT**

Hormis chez les lamantins et une espèce de kangourou, les dents repoussent verticalement chez les mammifères. Des biologistes lyonnais ont trouvé une autre exception : le rat taupe argenté de Tanzanie. Chez ce rongeur, les dents repoussent horizontalement : quand les dents de devant sont usées, de nouvelles apparaissent en arrière, les poussent jusqu'à ce qu'elles tombent et les remplacent. Mais, de ce mécanisme en « tapis roulant » à la fin des implants dentaires, il reste un grand pas à franchir...

**UN ANCIEN ATELIER D'ARTISTE**

On pensait que l'usage de l'ocre s'était répandu il y a 60 000 ans. En Afrique du Sud, Christopher Henshilwood a mis au jour des outils pour broyer ce pigment et deux coquilles d'ormeaux [illegible] ant et qui dateraient d'environ 100 000 ans. [illegible] les premiers humains pouvaient préparer et stocker cette matière. Les premiers *Homo sapiens* étaient déjà des chimistes !

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



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

STATISTIQUES GRAPHIQUES GESTION DE DONNÉES

# L'outil statistique intégré le plus complet sur le marché

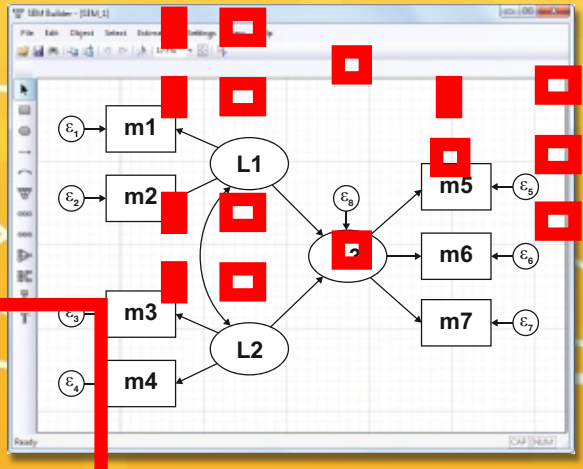
STATA®

STATA/IC
495 €HT*
ÉDUCATION

UCM

Multivariate GARCH

EBCDIC files




ARFIMA

Nouveau !

## Gestion du SEM

(modélisation par équations structurelles)

```
sem (L1 -> m1 m2)
    (L2 -> m3 m4)
    (L3 <- L1 L2)
    (L3 -> m5 m6 m7)
```

GMM

SUR

MAR

FIML

ROC analysis

# NOUVELLE VERSION

12

**Nous contacter pour toute mise à jour !**

Plus d'informations sur :
**www.ritme.com/go/stata**

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

(*) Tarif "Éducation" soumis à condition, et susceptible de modification sans préavis. Offre valable jusqu'au 31 décembre 2011. Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais. Livraison par DVD-Rom. Cette offre est spécialement destinée à un public professionnel, et exprimée en Euros hors TVA (19,6%) et frais de port. Toutes les marques citées sont des marques déposées par leur propriétaire.
© Copyright 2011 RITME. Stata est une marque déposée par StataCorp.

RITME INFORMATIQUE
*Distributeur officiel en France*

# ON EN REPARLE

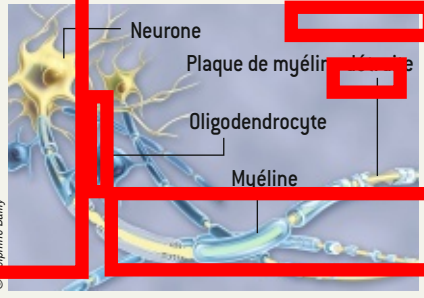
## Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

### UNE PAIRE DE TROUS NOIRS DANS UNE GALAXIE SPIRALE

Les trous noirs sont parmi les objets les plus mystérieux de l'Univers, mais on ne peut les observer que de façon indirecte, grâce à leurs effets gravitationnels sur les étoiles voisines et au rayonnement émis par le gaz chaud qui tombe en spirale sur eux (voir *Portrait d'un trou noir*, *Pour la Science*, mars 2010, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer389). En utilisant le télescope spatial à rayons X *Chandra*, des astronomes de la NASA ont découvert une paire de trous noirs supermassifs dans la galaxie spirale NGC 3996, semblable à la Voie lactée et située à 160 millions d'années-lumière (*Nature*, 1 septembre 2011). C'est la première fois que l'on trouve une paire de trous noirs si proche et dans une galaxie spirale semblable à la nôtre. Séparés de 490 années-lumière, les deux trous noirs seraient des restes de la fusion, dite mineure, d'une grande et d'une petite galaxie.

### LES GÈNES DE LA SCLÉROSE EN PLAQUES

La sclérose en plaques est une maladie neurologique qui touche 2,5 millions de personnes dans le monde, surtout de jeunes adultes. L'enveloppe protectrice des fibres nerveuses, la gaine de myéline, est détruite par plaques dans le cerveau et la moelle épinière. Cette gaine permet la conduction rapide de l'influx nerveux, de sorte que sa destruction provoque des troubles neurologiques de la vue, de la marche, du toucher, de la concentration, etc., qui sont handicapants. Or si l'on sait comment se forme cette gaine – des cellules nommées oligodendrocytes entourent de leur prolongement les fibres nerveuses –, on ignore comment favoriser la remyélinisation (voir *Myélinisation et sclérose en plaques*, *Pour la Science*, septembre 2004, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer323). Une vaste étude internationale, à laquelle ont participé des chercheurs français coordonnés par l'équipe de Bertrand Fontaine, à l'Institut du cerveau et de la moelle (INSERM-CNRS-Université Pierre et Marie Curie), vient d'identifier de nouveaux facteurs génétiques de la maladie (*Nature*, 11 août 2011). À partir de l'ADN de plus de 9000 personnes atteintes de sclérose en plaques et de plus de 17 000 personnes saines, les neuroscientifiques ont montré que 29 nouveaux variants génétiques augmentent le risque de développer la maladie. La plupart des gènes identifiés participent au fonctionnement du système immunitaire, en particulier des lymphocytes T, des globules blancs qui reconnaissent les pathogènes, mais qui peuvent aussi s'attaquer aux cellules du soi. D'autres gènes interviennent dans la synthèse des interleukines, des molécules de l'inflammation. Cela confirme que le système immunitaire est la cause de la démyélinisation ou qu'il pourrait empêcher la remyélinisation ; on sait en effet que de jeunes oligodendrocytes sont présents dans le système nerveux central et pourraient à nouveau enrober les fibres nerveuses. Deux autres gènes découverts participent au métabolisme de la vitamine D, renforçant l'idée que les personnes déficientes en cette vitamine ont un risque accru de développer la maladie.

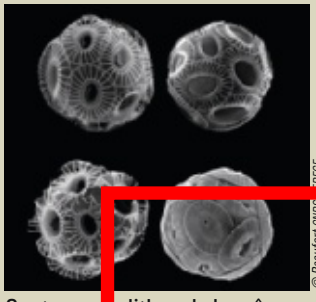


© Delphine Bailly

La gaine de myéline, élaborée par les oligodendrocytes autour des fibres nerveuses, est détruite par plaques dans la sclérose en plaques.

### DES SUPERCOCCOLITHOPHORES

Les océans sont de plus en plus acides : un tiers du dioxyde de carbone atmosphérique se retrouve dans les océans, où il modifie l'acidité de l'eau. Or des milliards d'organismes marins, tels les coraux, les foraminifères, les coccolithophores ou les ptéropodes, fabriquent leur squelette calcaire dans l'océan, à partir de carbonates dissous, et risquent d'en souffrir (voir *L'acidification des océans : l'écosystème menacé*, *Pour la Science*, mai 2006, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer343). Mais Luc Beaufort, du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement à Marseille, et ses collègues ont trouvé des organismes qui se sont adaptés aux océans acides (*Nature*, 4 août 2011). Les coccolithophores sont des cellules microscopiques qui forment leur microsquelette calcaire, le coccolithe, à la surface de l'eau. Ils représentent une grande part de la masse sédimentaire marine, car les coccolithes s'accumulent au fond des océans. Les chercheurs ont étudié la réaction de ces organismes à l'acidification des océans, en milieu naturel, en pesant les coccolithes récoltés en différents endroits des océans. Ainsi, la calcification des coccolithophores est moindre quand les eaux sont acides. Cependant, au large du Chili, dans des régions parmi les plus acides de l'océan Pacifique, les scientifiques ont observé des coccolithes très calcifiés, comparé à ceux présents dans d'autres eaux de *p*H équivalent. Par analyse génétique, ils ont montré que les souches de coccolithophores dans ces eaux acides diffèrent des autres et qu'elles ont pu s'adapter à un environnement peu favorable à leur calcification. Reste à trouver comment elles ont fait.


© Beaufort CNRS-CEREGE

Quatre coccolithes de la même espèce (*Emiliania huxleyi*), vus au microscope électronique à [illegible], présentant des différences de calcification.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance

CASDEN Banque Populaire - 77420 Marne-la-Vallée cedex 2 - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siret n° 784 275 778 00942 - RCS Meaux. Document non contractuel. - **Crédit photo : Jupiter images**

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**

POINT DE VUE

# La carte bancaire ne doit pas remplacer la carte *Vitale* !

*La solidarité sur laquelle repose la Sécurité sociale s'effrite au fil des réformes. L'avenir de notre système de santé devra être au cœur du débat politique lors des élections de 2012.*

**André GRIMALDI**

Le *Manifeste pour une santé égalitaire et solidaire* a été réalisé à l'initiative de médecins et de spécialistes de santé publique non-médecins. Il est signé par 123 personnalités de tous horizons, toutes affirmant leur attachement aux valeurs d'égalité et de solidarité qui ont fondé le système de santé français. Elles témoignent de leur inquiétude face à l'accroissement des inégalités en matière de santé.

Ce manifeste a pour ambition de faire en sorte que le débat sur la santé ne soit pas une nouvelle fois escamoté lors de la prochaine campagne présidentielle. Nous sommes en effet convaincus que notre système de santé est en train de changer profondément sans que les citoyens aient eu à en décider faute d'avoir pu en débattre. Le système de santé français qui s'est développé depuis la création de la Sécurité sociale en 1945 était fondé sur un système mixte public/privé. Le financement est assuré à la fois par la Sécurité sociale et par les assurances complémentaires, mutuelles et assurances privées. Mais tandis que la Sécurité sociale fonctionne selon le principe de solidarité – chacun paie selon ses moyens et reçoit selon ses besoins –, les mutuelles et les assureurs privés fonctionnent avec des primes indépendantes des revenus et dépendantes du risque encouru. La « gouvernance » de notre système est elle-même bicéphale, assurée à la fois par la Sécurité sociale et par l'État. La Sécurité sociale qui paie, mais c'est l'État qui fixe les prix à la suite de négociations avec les industriels de la santé. Ce système mixte s'est développé jusque dans les années 1980, à la satisfaction et des usagers et des professionnels, mais au prix d'un coût croissant atteignant aujourd'hui près de 12 pour cent du produit intérieur brut, PIB.

En 2000, l'Organisation mondiale de la santé consacrait le système français comme le meilleur du monde, malgré ses imperfections et ses inégalités persistantes. Mais l'augmentation des coûts de la santé de trois à quatre pour cent par an pose le problème de sa régulation. Non pas que la France dépense beaucoup plus que les autres pays développés : nous sommes en deuxième position en proportion du PIB, mais en sixième position derrière la Suisse, le Canada, l'Australie, les Pays-Bas et les États-Unis, et juste devant l'Allemagne, en euros dépensés pour la santé par habitant.

Quoi qu'il en soit, il nous faut choisir le type de régulation des coûts de santé que nous souhaitons : une régulation par les professionnels, censés appliquer le juste soin au moindre coût, et par les usagers, supposés ne pas abuser de ce bien collectif forcément limité et donc précieux, est à l'évidence insuffisante. Deux types de régulation sont possibles : la régulation par le marché et la régulation publique.

**EN FRANCE, 15 POUR CENT**
de la population renoncent à des soins pour des raisons financières.

La régulation par le marché vise à reporter une part croissante des soins sur les ménages directement ou par l'intermédiaire des mutuelles et des assurances privées. Ce choix représente une double rupture dans la solidarité entre riches et pauvres, puisque les pauvres paient beaucoup plus que les riches proportionnellement à leurs revenus, entre bien-portants et personnes à risque, ces dernières, et en particulier les personnes âgées, payant plus que les bien-portants à risque faible. Nous sommes engagés dans cette voie, mais nous approchons du point de rupture.

En effet, la Sécurité sociale se désengage de plus en plus du remboursement des soins courants et consacre ses moyens aux plus pauvres couverts par la couverture mutuelle universelle, CMU, et aux patients atteints des pathologies les plus graves. Pour les soins courants, c'est-à-dire les soins prodigués à 80 pour cent de la population, elle ne rembourse plus que 50 pour cent des frais, tandis que les mutuelles et assureurs privés augmentent le montant de leurs primes de cinq à sept pour cent par an. Lorsque les personnes appartenant aux classes moyennes constateront qu'elles paient de plus en plus pour la santé des autres et reçoivent de moins en moins de la Sécurité sociale lorsqu'elles sont elles-mêmes malades, elles demanderont à en finir avec ce système solidaire. En France aujourd'hui, 15 pour cent de la population renoncent à des soins pour des raisons financières, et ce chiffre dépasse 30 pour cent pour les



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

quatre millions de personnes qui n'ont pas d'assurance complémentaire.

À l'opposé de cette régulation par le marché, nous proposons dans le manifeste une régulation publique. Celle-ci suppose de revoir la liste des médicaments, des produits de santé et des actes médicaux relevant de la solidarité et ceux qui n'en relèvent pas. Il faut donc non seulement évaluer le rapport bénéfice / risque des médicaments, mais également, ce qui n'est pas fait, le rapport bénéfice / coût pour la société. Encore faudrait-il qu'on en finisse avec la dualité entre la commission évaluant l'amélioration du service médical rendu et le comité négociant les prix avec l'industrie, dualité qui a permis au Médiator d'être remboursé à 100 pour cent pour les diabétiques bien qu'à deux reprises son amélioration du service médical rendu ait été jugée faible ou nulle et qu'il n'ait jamais été officiellement recommandé aux diabétiques ! Coût pour la Sécurité sociale : 1,2 milliard d'euros !

## Réintroduire bon sens, transparence et éthique

Le remboursement de médicaments à 15 ou à 30 pour cent est un non-sens. Ou un médicament est utile et il doit être remboursé, ou il est inutile ou peu utile et il ne doit pas être remboursé du tout ! En outre, est-il logique que la Sécurité sociale continue à rembourser les cures thermales ? Maintenir notre système de solidarité suppose de revenir au taux de remboursement minimal originel de la Sécurité sociale de 80 pour cent, tout en maintenant la CMU et le remboursement à 100 pour cent pour les affections coûteuses de longue durée. Les assurances complémentaires n'auraient à rembourser que le ticket modérateur résiduel de 20 pour cent. En outre, une évaluation comparative des pratiques médicales devrait permettre de réduire les écarts injustifiables pouvant aller de un à trois selon les établissements de santé quant au nombre de césariennes ou de poses de stents coronariens pratiquées.

Parallèlement à cette réduction des dépenses médicalement injustifiées, il faudra revoir les recettes de la Sécurité sociale en supprimant une grande partie des niches qui atteignent 35 milliards d'euros. Tous les revenus doivent être soumis à un prélèvement à taux progressif pour financer la solidarité. Par ailleurs, la réduction des dépenses des assurances complémentaires, mutuelles et assurances privées, devrait permettre un transfert d'une grande part de leurs primes vers la sécurité sociale. Dès lors, au lieu de financer les dépenses de santé par la dette en les reportant sur les générations futures, on pourra appliquer une règle d'or : toute augmentation globale des dépenses de santé médicalement justifiées devra être payée l'année suivante par une augmentation automatique des recettes. Les Français devront alors choisir démocratiquement la part de la richesse nationale qu'ils veulent consacrer à leur système de santé.

En effet, la régulation par le marché, comme c'est le cas aux États-Unis, ne peut conduire qu'à l'échec, et ce pour deux raisons : d'abord parce que le patient n'est pas un « consommateur éclairé », il n'a pas choisi d'être malade, il est une personne angoissée qui n'est pas à même de juger de la pertinence des prescriptions, et ensuite parce que les frais de gestion des mutuelles correspondent à 22 pour cent de leur chiffre d'affaires, contre moins de 5 pour cent pour la Sécurité sociale.

Le choix se situe donc entre, d'une part, un système solidaire égalitaire régulé et, d'autre part, une modération relative de la dépense publique grâce à un transfert des frais aux « ménages » et aux assurances complémentaires, au prix d'une inégalité croissante et d'un coût final pour l'ensemble de la société beaucoup plus élevé. Nous refusons que ce choix soit fait en catimini. L'élection présidentielle doit être l'occasion d'affronter cette question dont les enjeux sont considérables, sans se contenter de banalités sur l'indispensable « maîtrise des dépenses » et la nécessaire « responsabilisation des patients » alors que « les caisses sont vides ». ■

*André Grimaldi est professeur de diabétologie à la Pitié-Salpêtrière à Paris.*

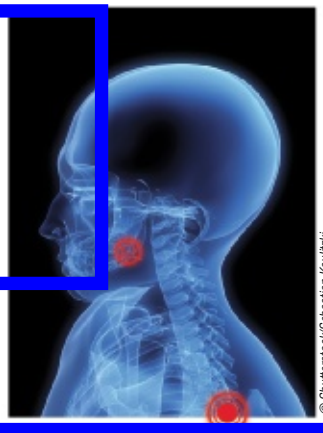
A. Grimaldi *et al.*, Manifeste pour une santé égalitaire et solidaire, Odile Jacob, 2011.

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

VRAI OU FAUX

# Des douleurs dorsales peuvent-elles être dues à des défauts aux dents ?

*Non. Mais cette idée reçue révèle que les sujets souffrant de douleurs chroniques ne sont pas toujours pris en charge correctement.*



© Shutterstock/Sebastian Kaulitzki

**Bénédicte SALTHUN-LASSALLE**

S'il est un sujet polémique dans la communauté des praticiens en médecine bucco-dentaire, c'est bien celui-là : des défauts de denture (l'ensemble des dents à un instant donné) provoqueraient des douleurs musculaires dans le dos, le cou, les épaules et la face. En effet, il n'est pas rare que des personnes ayant des douleurs musculaires diffuses finissent par consulter leur chirurgien-dentiste. Qu'en est-il vraiment ? Revenons sur l'histoire de cette idée, non fondée scientifiquement, et voyons ce qu'elle cache.

L'occlusion dentaire est la façon dont les dents mandibulaires (du bas) s'adaptent aux maxillaires (les dents du haut). Elle définit le calage et le centrage des mâchoires. Certains pensent que si l'équilibre des dents est perturbé, l'équilibre de l'ensemble du corps peut l'être aussi, créant des douleurs musculaires, dans le dos notamment. En effet, l'articulation temporo-mandibulaire et ses muscles, qui bougent quand on ouvre la bouche, seraient liés « fonctionnellement » aux muscles du dos et du cou.

Une malocclusion – une mauvaise occlusion – dentaire, due par exemple à la perte ou au déplacement d'une ou de plusieurs dents, à des prothèses mal adaptées ou des obturations (les « plombages ») défectueuses, a souvent été soupçonnée de créer des douleurs dorsales. Tout commence dans les années 1920 aux États-Unis : le dentiste américain H. Prentiss proposa alors un modèle dans lequel les problèmes d'occlusion pouvaient créer des déséquilibres dans les mâchoires et des dysfonctionnements des articulations. Puis en 1934, sur la côte Ouest des États-Unis, à une époque où les dentistes tentaient d'évoluer de simples arracheurs de dents à des « reconstructeurs » de la denture, le médecin d'origine belge James Costen décrivit un syndrome à partir d'observations de huit patients (seulement !) auxquels il manquait plusieurs dents : selon lui, la malocclusion entraînerait un certain nombre de troubles, tels qu'une diminution de l'audition, des céphalées, des acouphènes et des brûlures buccales. En remplaçant les dents manquantes, les dentistes pouvaient traiter ces pathologies supposées.

## Aucune preuve

Selon Paul Pionchon, chirurgien-dentiste, psychologue et spécialiste de la douleur orofaciale et bien économique de la face au CHU de Clermont-Ferrand, c'est parce qu'ils sont attachés à donner une dimension plus médicale à leurs soins que les dentistes prennent en charge des troubles inexpliqués, tels que des troubles de la posture et des douleurs supposés dus à des malocclusions. Malheureusement, cette approche biomécanique conduit à des soins invasifs, irréversibles et onéreux, sans que leur efficacité ait été démontrée. En 2009, une étude menée à Marseille a suggéré que quelques positions de la mandibule peuvent influer sur la posture, mais uniquement dans certaines conditions, par exemple en association avec des déficits visuels et des anomalies des pieds. Aucune étude scientifique n'a trouvé de lien univoque entre mauvaises occlusions et douleurs généralisées. En fait, les douleurs de brûlure décrites par Costen sont des douleurs neuropathiques, et non des douleurs musculosquelettiques. Les douleurs neuropathiques sont dues à une lésion d'un nerf ou un dysfonctionnement du système nerveux central. Elles sont multifactorielles et souvent inexpliquées.

Des personnes souffrant de la face consultent leur dentiste en pensant qu'il s'agit d'un problème dentaire. Mais selon P. Pionchon, ces personnes peuvent être atteintes de douleurs musculosquelettiques locales ou généralisées connues sous le nom de fibromyalgie. Ces patients, surtout des femmes, ont mal à différents endroits du corps pendant des périodes plus ou moins longues et présentent des troubles du sommeil et de l'humeur. Ils ressentent donc aussi des douleurs faciales. Or cette pathologie mal reconnue en France est due à un dysfonctionnement des systèmes de contrôle de la douleur et n'a rien à voir avec une malocclusion.

Un défaut de la denture ne provoque pas de douleurs dans le reste du corps. Toutefois, il peut cacher une maladie difficile à diagnostiquer, de sorte que le patient se retrouve chez son dentiste – qui ne pourra pas l'aider. Le découpage de la médecine en différentes spécialités complique le traitement des douleurs chroniques.

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



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# SCIENTIFIQUES : CONSTRUISONS ENSEMBLE VOTRE PROJET DE FORMATION

Sciences et technologies

Santé

Médecine

Formations pluridisciplinaires

## Faites le choix de l'excellence

- UPMC (Université Pierre & Marie Curie) une **université scientifique et médicale française d'envergure internationale**
- Des formations qui s'appuient sur des **intervenants experts dans leur domaine** et des **plateformes technologiques de pointe**
- Un des premiers centres de formation continue universitaire, certifié **qualité ISO 9001** pour ses prestations de formation continue et de VAE

## Une offre complète qui s'adapte à votre demande

- **500 formations** au catalogue (du stage court de spécialisation aux diplômes nationaux et d'université)
- Aide à la reprise d'études et organisation de **parcours individualisés** pour tous nos diplômes
- **Formations sur mesure**

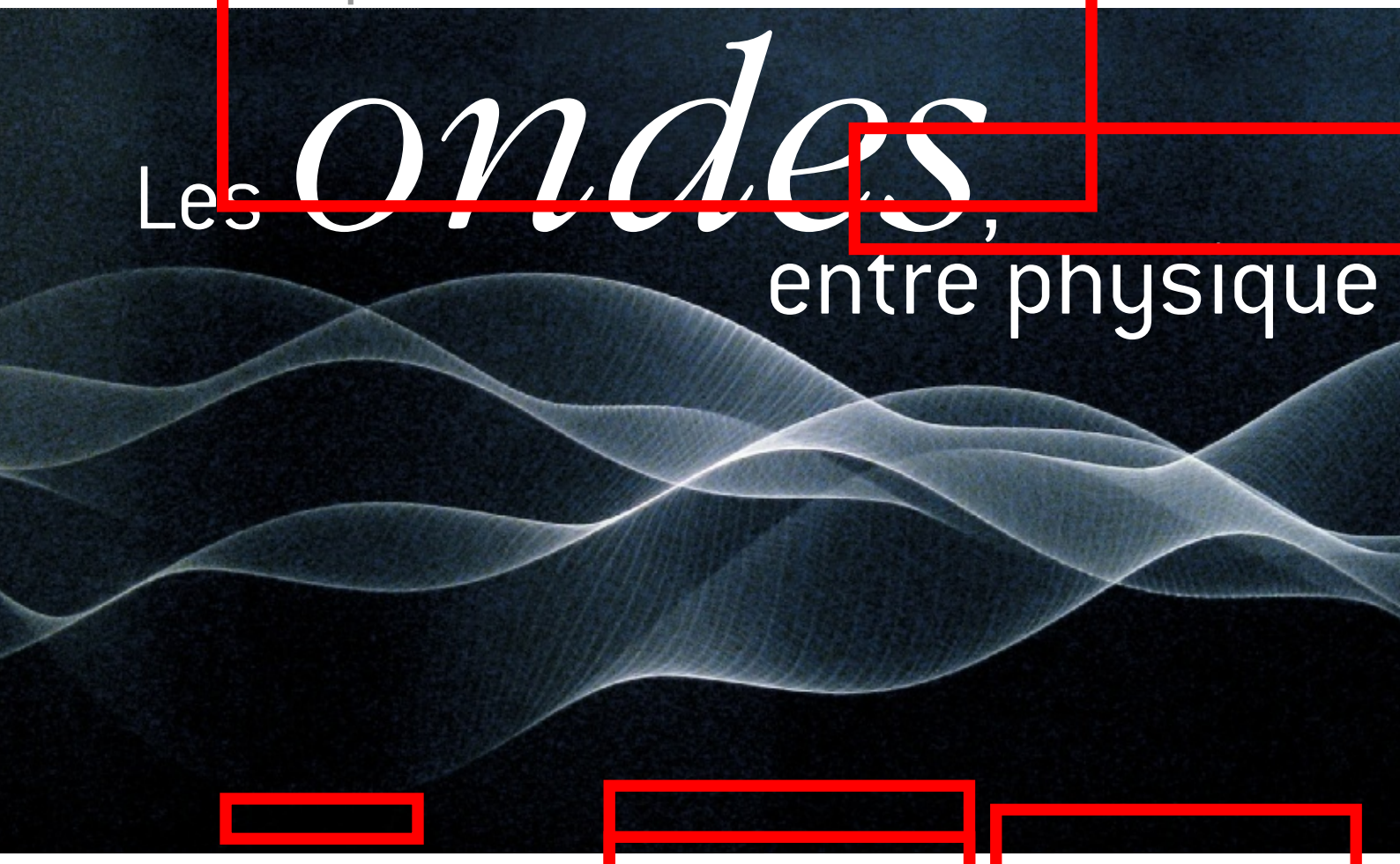
catalogue en ligne
www.fc.upmc.fr

**Contact et renseignements**
**Formation continue de l'UPMC**
01 53 10 43 20
formation.continue@upmc.fr

UPMC SORBONNE UNIVERSITÉS

© Fotolia

# Les *ondes*, entre physique



**Claude Bardos**

**Malgré leur diversité, les ondes constituent un phénomène physique universel. Leur description et leur compréhension sont liées aux grandes avancées de la physique et des mathématiques.**

Les ondes sont présentes partout autour de nous et ont été observées bien avant l'avènement de la science moderne. Sous leur forme probablement la plus évidente, ce sont les rides circulaires créées à la surface d'un étang par la chute d'un petit cailloux, les vagues de l'océan créées par le vent, les marées dues à l'attraction du Soleil et de la Lune, les mascarets qui remontent les fleuves, etc. De fait, le mot onde provient du latin *unda*, qui signifie eau courante, ce qui souligne la proximité de la notion d'onde avec les phénomènes constatés sur des étendues d'eau. La langue anglaise n'a d'ailleurs qu'un seul et même mot *(wave)* pour désigner une onde et une vague.

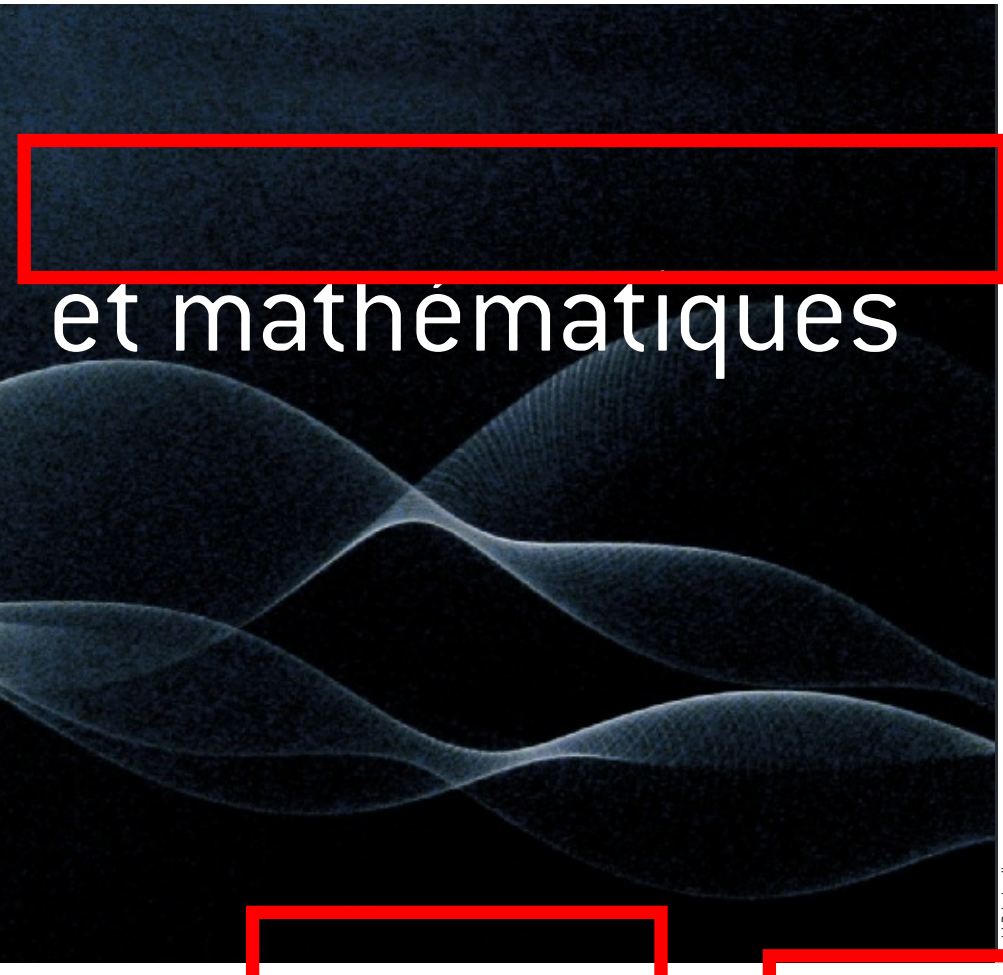
D'autres types d'ondes sont faciles à remarquer, comme celles qui parcourent une corde que l'on agite à l'une de ses extrémités *(voir la figure 1)*. Mais les ondes prennent souvent des formes moins visibles : les sons, la lumière, les tremblements de terre sont aussi des phénomènes ondulatoires. Les sons mettent en jeu des ondes de pression se propageant dans l'air, la lumière des ondes de vibration du champ électromagnétique se propageant dans le vide, les tremblements de terre des ondes mécaniques se propageant dans le sol. À un niveau plus fondamental encore, la physique quantique associe à la matière et à ses interactions des ondes de nature abstraite, mais indispensables à la description et à la compréhension des phénomènes. Enfin, les ondes, qu'elles soient électromagnétiques ou autres, tiennent une place capitale dans les technologies modernes, comme en témoignent la télévision, les radars, la téléphonie mobile, la radiographie médicale ou industrielle, les fours à micro-ondes, l'échographie, etc.

L'histoire de l'étude des ondes se confond assez largement avec celle de la physique et des mathématiques. Si Pythagore et son école, vers le Ve siècle avant notre ère, ont mis en évidence des rapports numériques portant sur les cordes vibrantes et les sons musicaux, une véritable science des ondes n'est apparue qu'avec la naissance de la science moderne, à l'époque de Galilée et de Newton, au XVIIe et



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# et mathématiques



Daniel Palacios Jimenez

XVII[e] siècles. Le premier domaine concerné fut l'acoustique, avec Galilée et le père Marin Mersenne. En particulier, Galilée a relié le « nombre de vibrations » d'une corde à sa longueur, à sa masse et à sa tension, ainsi qu'au son plus ou moins aigu qu'elle produit. Quant à Mersenne, pionnier de l'acoustique, il fut le premier à évaluer la vitesse du son, dont il avait une conception ondulatoire.

La nature de la lumière a donné davantage de soucis aux physiciens. Malgré certaines de ses expériences qui s'interprètent plus facilement en termes d'ondes, Newton considérait la lumière comme un ensemble de corpuscules. D'autres savants, comme le jésuite Francisco Maria Grimaldi (1618-1663), défendaient une conception ondulatoire. Le débat s'est prolongé jusqu'au début du XVIII[e] siècle, lorsque la balance a penché du côté de l'onde grâce notamment à la théorie proposée en 1815 par le physicien français Augustin Fresnel. Et en 1864, l'Écossais James Clerk Maxwell unifia en un seul ensemble d'équations (qui portent son nom) l'électricité, le magnétisme, l'induction électromagnétique et la théorie ondulatoire de la lumière – ce fut une étape cruciale du développement de la physique théorique.

Dans les équations de Maxwell, la vitesse de la lumière apparaît comme une constante absolue, indépendante de l'observateur et de ce fait contradictoire avec le principe de relativité de la physique galiléenne et newtonienne. C'est ce qui a conduit Einstein à sa théorie de la relativité restreinte, publiée en 1905. Par un curieux retour des choses, Einstein est aussi celui qui a montré clairement que l'énergie lumineuse est transportée par quantités bien définies, des « quanta » qu'on appela plus tard photons, ce qui représentait un retour – partiel – de la conception corpusculaire de la lumière. Et Einstein a participé à l'émergence de la physique quantique où la notion d'onde intervient au niveau le plus fondamental.

## Oscillation et propagation

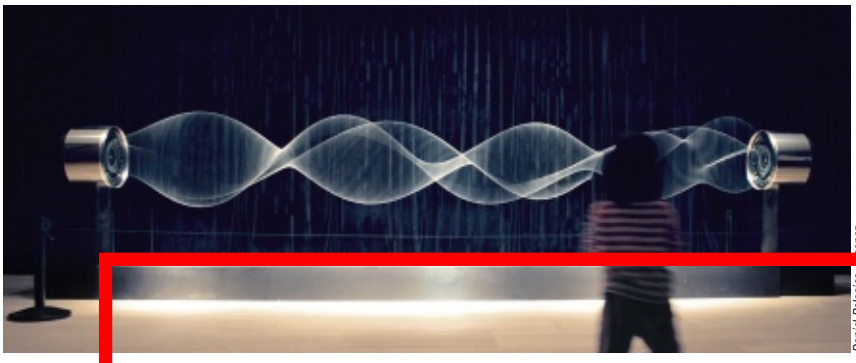
Ce rapide survol de plus de trois siècles ne rend pas justice aux efforts des physiciens, aux débats qui les ont agités, aux découvertes intrigantes ou surprenantes qu'ils ont faites. Toujours est-il que les ondes ont occupé dans cette histoire une place de choix. Elles ont aussi grandement stimulé les mathématiciens. L'étude des ondes a en effet nécessité l'élaboration d'outils de plus en plus puissants et complexes, ce qui a contribué au développement des mathématiques depuis Newton et Leibniz jusqu'à nos jours. Je vais présenter ici certains de ces développements en relation avec les ondes, car ils aident à comprendre ce qu'est une onde et ce que ce concept a de si universel.

Qu'est-ce qu'une onde ? Il est difficile de donner une réponse univoque à cette question. On peut dire que le terme onde désigne la propagation, de proche en proche, d'une variation à laquelle est soumise une certaine grandeur physique. Par exemple, une onde à la surface de l'eau correspond à la propagation d'un changement de la hauteur de l'eau par rapport à sa hauteur d'équilibre. La variation qui se propage prend souvent la forme d'une oscillation, d'une vibration. De fait, l'oscillation et la propagation sont deux aspects complémentaires et pratiquement indissociables de la notion d'onde.

Pour comprendre ce qu'est une onde et comment on la décrit mathématiquement,

### L'ESSENTIEL

- On rencontre les ondes partout dans la nature. Il s'agit généralement d'oscillations qui se propagent.
- Pour une onde évoluant dans un domaine clos, l'oscillation constitue l'aspect dominant. En régime linéaire, on peut la décrire à l'aide d'oscillations fondamentales nommées modes propres.
- Le comportement des ondes se complique beaucoup en présence d'effets non linéaires et du phénomène de « dispersion ».



Daniel Palacios Jimenez

**1. DANS CETTE INSTALLATION** de l'artiste espagnol Daniel Palacios Jimenez (Berlin, 2006), une corde élastique est agitée à ses extrémités. Les ondes ainsi créées se propagent dans les deux sens et forment des ondes à peu près stationnaires, que perturbent les mouvements des spectateurs, captés par des caméras et transmis au mécanisme. Les variations des oscillations de la corde se traduisent aussi par des variations du son qu'elle produit. *(Voir aussi la photographie page 22.)*

commençons par la description d'une oscillation simple : l'oscillation de l'extrémité d'un ressort de part et d'autre de sa position d'équilibre *(voir la figure 2)*. On suppose pour simplifier que le ressort, de masse négligeable, est posé sur un plan horizontal sans frottement avec une masse $m$ attachée à son extrémité. Désignons par $x(t)$ la position, qui dépend du temps $t$, de cette masse par rapport à la position d'équilibre. Si cet écart $x(t)$ est petit, alors la force de rappel du ressort vers la position d'équilibre est, en première approximation, proportionnelle à l'écart. Autrement dit, sa valeur algébrique est $-kx(t)$, où $k$ est une constante positive appelée la raideur du ressort.

D'après la deuxième loi de Newton, la force appliquée à un mobile est égale au produit de sa masse par son accélération. Dans notre cas, cela s'écrit : $-kx(t) = mx''(t)$, où $x''(t)$ est la dérivée seconde de $x(t)$. En posant $\omega^2 = k/m$, on obtient que le mouvement de l'extrémité du ressort obéit à l'équation différentielle $x''(t) + \omega^2 x(t) = 0$.

On montre que cette équation élémentaire a pour solution générale :

$$x(t) = a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t),$$

où $a$ et $b$ sont des constantes déterminées de façon unique par les conditions initiales, c'est-à-dire par la donnée de la position et de la vitesse du mobile à l'instant initial $t = 0$ (ou à tout autre instant fixé). Cette solution est périodique, la période $T$ étant égale à $2\pi/\omega$ ; la fréquence $\nu$ de l'oscillation est l'inverse de la période ($\nu = 1/T$), tandis que $\omega$ est la « pulsation » de l'oscillation, qui est proportionnelle à sa fréquence ($\omega = 2\pi\nu$). Elle est même sinusoïdale, puisque $a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t)$ s'écrit aussi sous la forme $A\cos(\omega t + \varphi)$, où $A$ et $\varphi$ se calculent à partir de $a$ et $b$.

On voit ainsi apparaître, dans ce modèle simple de l'oscillation du ressort, les fonctions périodiques élémentaires sinus et cosinus qui jouent un rôle fondamental dans la description des phénomènes ondulatoires. Une autre remarque importante est que le modèle mathématique du ressort s'applique à d'innombrables autres systèmes et est de ce fait très général : on le nomme « oscillateur harmonique ».

## Équations linéaires pour petites vibrations

En effet, toute oscillation de part et d'autre d'une valeur d'équilibre se décrit par une équation différentielle semblable à celle du ressort, à condition que les amplitudes de l'oscillation ne soient pas trop grandes. Pourquoi ? Parce que l'expression d'une force $F(x)$ de rappel vers la valeur d'équilibre en fonction de l'écart $x$ à la valeur d'équilibre peut toujours s'écrire si la force est mathématiquement assez régulière) comme un développement en série $F(x) = k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \ldots$, où $k_1$, $k_2$, $k_3$, etc. sont des constantes. Le terme $k_1x$ est le terme linéaire, les suivants sont les termes non linéaires. Or si l'amplitude de l'oscillation $x$ est petite, ce qui est souvent le cas en pratique, $x^2$ est négligeable par rapport à $x$, $x^3$ est négligeable par rapport à $x^2$, etc. Autrement dit, au premier ordre d'approximation, seul subsiste le terme linéaire et l'équation différentielle de l'oscillateur se réduit à celle de l'oscillateur harmonique, dont le comportement est décrit par des fonctions sinusoïdales.

Dans le modèle d'oscillateur harmonique que nous venons de considérer, aucune force extérieure n'est imposée au système. Lorsqu'une telle force est présente, l'évolution dans le temps de l'oscillateur peut être très différente. Cette évolution doit désormais obéir à l'équation :

$$x''(t) + \omega^2 x(t) = f(t)$$

où $f(t)$ représente les forces extérieures appliquées au système. On démontre que la solution générale s'écrit alors sous la forme :

$$x(t) = a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t) + I_\omega(t),$$

où la fonction $I_\omega(t)$ est donnée par une certaine intégrale où intervient la force extérieure $f$ qui dépend du paramètre $\omega$. Selon l'expression de $f$, on peut ou non trouver une formule explicite pour $I_\omega(t)$.

Le cas où la force extérieure est une fonction sinusoïdale du temps, de pulsation $\omega'$, est particulièrement important, car il peut alors se produire un phénomène de résonance, un effet fréquemment rencontré avec les ondes. Si la pulsation $\omega'$ du forçage extérieur est différente de la pulsation propre $\omega$ de l'oscillateur, on trouve que l'oscillation $x(t)$ est une somme de fonctions sinusoïdales de pulsations $\omega$, $\omega'$, $\omega + \omega'$ et $\omega - \omega'$, dont l'amplitude reste bornée à tout instant. Mais si $\omega' = \omega$, l'expression de $x(t)$ fait apparaître, en plus de termes périodiques de pulsations $\omega$, $\omega'$ et $\omega + \omega'$, un terme apériodique proportionnel à $t\cos(\omega t)$, c'est-à-dire qui oscille avec une amplitude proportionnelle au temps écoulé. C'est le phénomène de résonance : lorsque la fréquence de la force extérieure est égale à la fréquence propre du système, l'amplitude de l'oscillation augmente sans limite avec le temps, jusqu'à ce que l'on sorte du régime linéaire ou que le système subisse une modification brutale. C'est par un tel phénomène de résonance qu'un pont qui vibre peut s'écrouler si une troupe le franchit en marchant au pas.

La discussion qui précède sur l'oscillateur harmonique relève de la mécanique newtonienne appliquée à un point matériel mobile (la masse $m$ dans le cas du ressort). N'y interviennent que des fonctions d'une seule variable, le temps $t$. Pour décrire l'évolution de milieux continus tels qu'un solide ou un liquide, il faut introduire des fonctions qui dépendent non seulement du temps, mais aussi de la position dans l'espace, c'est-à-dire des coordonnées $x$, $y$ et $z$. Le problème se complique alors considérablement.

En particulier, les variations dans l'espace doivent être décrites par des dérivées par rapport aux coordonnées spatiales, et les équations différentielles ordinaires que l'on a en mécanique du point sont rem-



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

placées par des « équations aux dérivées partielles » en mécanique des milieux continus. Le premier exemple d'une telle équation est, semble-t-il, dû au mathématicien français Jean le Rond d'Alembert et concerne la vibration d'une corde ; il date de 1747 – mais si longtemps après l'invention du calcul infinitésimal pour les fonctions d'une seule variable, par Newton et Leibniz autour de 1670. Le mathématicien suisse Leonhard Euler suivra en 1755 en obtenant l'équation qui régit l'écoulement des fluides incompressibles et non visqueux. On est ainsi passé de la mécanique du point matériel à l'élasticité, puis à la mécanique des fluides.

## Ondes stationnaires dans un espace fermé

L'équation qui régit les vibrations d'une corde de longueur finie $L$ se déduit, comme pour le ressort, en appliquant la deuxième loi de Newton. Mais au lieu de l'appliquer à un point matériel, on l'applique à chacune des parties infinitésimales de la corde. On suppose celle-ci homogène, infiniment étroite, alignée au repos selon l'axe $Ox$ et fixée à ses deux extrémités, de coordonnées $x=0$ et $x=L$. On suppose aussi qu'elle est soumise à une force de tension $T$ constante et que chacun de ses points, repérés par leur coordonnée $x$, peut s'écarter transversalement de la position d'équilibre $u=0$ d'une petite quantité $u(x,t)$ *(voir la figure 3)*.

Un raisonnement géométrique assez simple sur un élément infinitésimal $dx$ de corde, de masse $\rho\,dx$, où $\rho$ est la masse de corde par unité de longueur, montre alors que, en posant $c^2 = T/\rho$, la deuxième loi de Newton se traduit en l'équation aux dérivées partielles :

$$\partial^2 u/\partial t^2 - c^2\,\partial^2 u/\partial x^2 = 0.$$

La notation $\partial u/\partial x$ désigne la dérivée de $u(x,t)$ par rapport à $x$ en considérant $t$ constant, $\partial u/\partial t$ la dérivée de $u(x,t)$ par rapport à $t$ en considérant $x$ constant, $\partial^2 u/\partial t^2$ la dérivée seconde de $u$ par rapport à $t$, etc. Ces dérivées portant sur des fonctions de plusieurs variables sont nommées « dérivées partielles ».

L'équation obtenue par d'Alembert constitue le prototype de l'équation des ondes à une dimension, où $c$ représente la vitesse de propagation de l'onde. Pour exprimer le fait que la corde est fixée à ses deux bouts, on complète l'équation par les conditions aux limites :

$$u(x=0,t) = u(x=L,t) = 0.$$

En cherchant pour l'équation de d'Alembert des solutions $u(x,t)$ sous la forme d'un produit $a(x)\,b(t)$ à variables séparées, on obtient les deux équations différentielles :

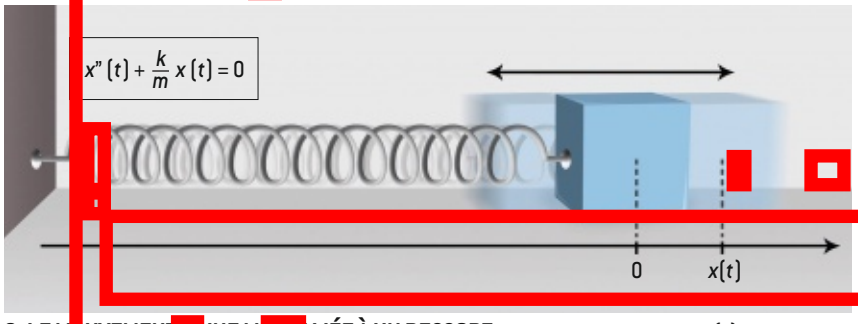
$a''(x) + \omega^2/c^2)\,a(x) = 0$ et $b''(t) + \omega^2\,b(t) = 0$,

où $\omega^2$ est, pour le moment, un paramètre positif quelconque. Ces deux équations sont exactement de la même forme que celle de l'oscillateur harmonique. On en déduit, compte tenu des conditions aux limites que l'équation de d'Alembert pour la corde vibrante a des solutions particulières de la forme :

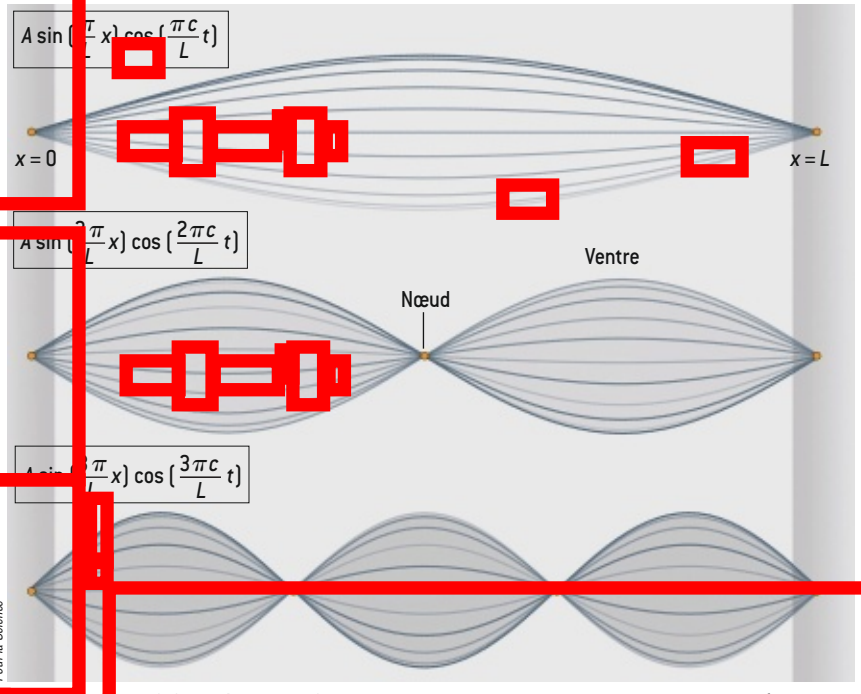
$$u_n(x,t) = A_n \sin(k_n x)\cos(\omega_n t + \phi_n),$$

où $n$ est un entier positif quelconque, $k_n = n\pi/L$ et $\omega_n = n\pi c/L = k_n c$, les constantes $A_n$ et $\phi_n$ restant à déterminer en fonction des conditions initiales par exemple.

Que signifie physiquement une telle solution ? En chaque point, la corde oscille dans le temps à une pulsation $\omega_n$, tandis que l'amplitude de l'oscillation est modulée le long de la corde par la fonction périodique $\sin(k_n x)$. Les points $x$ pour lesquels on a $\sin(k_n x) = 0$ ne vibrent pas du tout, ce sont les « nœuds » de vibration ; ceux pour lesquels $\sin(k_n x) = \pm 1$ vibrent avec l'amplitude maximale, ce sont les « ventres » de vibration. L'oscillation décrite par une fonction $u_n(x,t)$ est ce qu'on appelle une onde stationnaire, car les positions des nœuds et ventres de vibration restent fixes au cours du temps.




**2. LE MOUVEMENT D'UNE MASSE LIÉE À UN RESSORT** est décrit, pour un écart $x(t)$ petit par rapport à la position d'équilibre, par une équation différentielle linéaire simple *(cartouche)*, dont la solution est une fonction sinusoïdale du temps $t$. Une telle oscillation a un caractère très général.




**3. TROIS ONDES STATIONNAIRES** animant une corde fixée à ses deux extrémités (avec une amplitude très exagérée, et pour 11 instants successifs). Elles correspondent ici aux trois premiers modes propres d'oscillation de la corde, la fréquence de la deuxième onde étant le double de celle de la première, et la fréquence de la troisième le triple. Toute oscillation de la corde peut s'écrire comme une somme d'un nombre fini ou infini de ses modes propres.

L'AUTEUR

Claude BARDOS, mathématicien, est professeur émérite à l'Université Paris 7 (Denis Diderot). Il est membre du Laboratoire Jacques-Louis Lions à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

On appelle la solution $u_1(x,t)$, de la forme $\sin(k_1 x)\cos(\omega_1 t + \phi_1)$ avec $k_1 = \pi/L$ et $\omega_1 = \pi c/L$, le « mode fondamental » de vibration de la corde. Les autres solutions $u_n$ correspondent à des fréquences de vibration égales à un multiple entier de la fréquence fondamentale et sont qualifiées d'harmoniques. Les ondes stationnaires $u_n(x,t)$ sont aussi nommées modes propres de vibration, car elles caractérisent les vibrations possibles d'une corde qui n'est pas soumise à des forces extérieures.

Comme l'équation des ondes de d'Alembert est linéaire, toute somme finie d'harmoniques $u_n(x,t)$ est encore une solution possible. En fait, l'analyse mathématique moderne, introduite par le mathématicien allemand David Hilbert il y a un siècle, établit un résultat bien plus fort : toute solution de l'équation peut s'exprimer comme une somme de la forme :

$A_1(t)\sin(k_1 x) + A_2(t)\sin(k_2 x) + \ldots$

où $A_n(t)$ est une fonction sinusoïdale de pulsation $\omega_n$.

## Des modes propres

On montre que les fonctions $\sin(k_n x)$ forment en effet une « base » de l'espace fonctionnel adéquat pour décrire les oscillations de la corde de longueur $L$, c'est-à-dire un espace de fonctions où l'on peut définir des notions de distance, de produit scalaire, de convergence, etc. Dans ce cadre formel, les fonctions $\sin(k_n x)$ doivent leur importance au fait que ce sont des « fonc-

## La place privilégiée des ondes sinusoïdales

Pourquoi les sinusoïdes sont-elles si importantes dans la science des ondes ? De nombreux manuels de physique présentent systématiquement les solutions de l'équation des ondes sous forme sinusoïdale. Mais dans la réalité, l'évolution temporelle des ondes n'est jamais vraiment sinusoïdale, car une sinusoïde est une fonction idéale, partant d'un temps infini dans le passé et allant jusqu'à un temps infini dans le futur. Il faudrait ainsi que la source ayant donné naissance à l'onde soit active depuis un temps infini !

En pratique, il existe aussi bien des ondes impulsées très brèves, de spectre très large, que des ondes de forme temporelle très complexe. Il est vrai qu'en optique, les lasers peuvent émettre une onde lumineuse presque monochromatique, donc sinusoïdale. De même, les modes de vibration d'une corde dont les deux extrémités sont fixes correspondent à une oscillation sinusoïdale qui est modulée par une sinusoïde. Mais ces deux exemples ne sont que des cas particuliers.

Pour comprendre le caractère universel et l'intérêt pratique de la modulation sinusoïdale en physique des ondes, il faut regarder de plus près l'équation du régime linéaire. Dans sa variante acoustique, le champ ondulatoire vérifie une équation d'onde du type $\partial^2 u/\partial t^2 - c^2 \Delta u = S(\boldsymbol{r}, t)$, où la fonction source qui décrit l'ensemble des sources de l'onde (par exemple les haut-parleurs).

La relation qui existe entre le terme source $S(\boldsymbol{r}, t)$ (la cause) et l'onde $u(\boldsymbol{r}, t)$ (l'effet) a deux propriétés importantes. D'une part, elle est linéaire. D'autre part, si la vitesse $c$ de l'onde ne varie pas au cours du temps, elle est « invariante par rapport à l'origine du temps » : l'onde créée par un haut-parleur excité dans une heure sera la même, à une heure près, que celle créée par ce même haut-parleur maintenant. La source peut avoir toutes les formes possibles de modulation temporelle. Si par exemple c'est la membrane d'un haut-parleur qui vibre, la source peut s'écrire $S(\boldsymbol{r}, t) = \delta(\boldsymbol{r})\, s(t)$, où $s(t)$ est la modulation temporelle de la source.

L'intérêt mathématique de la modulation sinusoïdale est le suivant : seule modulation temporelle qui se conserve dans tout le champ ondulatoire. Autrement dit, si la source vibre de façon sinusoïdale, le champ acoustique $u(\boldsymbol{r}, t)$ mesuré en tous les points de l'espace aura la même modulation sinusoïdale (en revanche, l'amplitude et la phase de cette sinusoïde dépendront du point d'observation). Le champ $u(\boldsymbol{r}, t)$ oscillera partout avec la même pulsation $\omega$ que celle de la source. On dira que la sinusoïde est un invariant de l'opérateur de l'équation des ondes ; on dit aussi un « vecteur propre » de l'opérateur (ici $\Delta$) et l'effet (l'onde dans tout l'espace) aura exactement la même modulation temporelle.

Si, en revanche, tous les points du haut-parleur se déplaçaient pendant un temps bref avec une modulation temporelle quelconque (un créneau par exemple), la modulation temporelle de l'onde ne serait plus la même que celle de la source et différerait en chaque point de l'espace. Les signaux émis par chacun des points de la source mettent en effet un certain temps pour arriver en un point d'observation. En ce point l'onde résultera de la somme de toutes les ondelettes émises par la source. Or la somme de nombreux petits créneaux décalés les uns par rapport aux autres donne un créneau initial. Ce sera une fonction du temps compliquée, qui dépendra du point d'observation.

Parmi toutes les fonctions du temps, il n'en existe qu'une – la sinusoïde – qui se conservera : la somme d'une infinité de sinusoïdes de même pulsation $\omega$ et d'amplitudes différentes donnera toujours une sinusoïde de pulsation $\omega$. C'est là tout l'intérêt d'une source sinusoïdale. Un autre exemple de l'intérêt de la sinusoïde est l'émission d'un signal dans un milieu où la célérité de l'onde est très hétérogène (la vitesse $c(\boldsymbol{r})$ de l'onde dépend de la position $\boldsymbol{r}$). Par exemple, si une source émet un signal dans un milieu diffusant composé de nombreux obstacles, l'onde perçue en un point de l'espace sera la superposition de nombreux signaux élémentaires ayant suivi des trajets multiples. Si la source émet un signal bref, l'onde perçue pourra durer très longtemps avec des modulations très compliquées, qui ne ressembleront plus du tout à celle de la source. Mais si la source est modulée par une sinusoïde de pulsation $\omega$, quelle que soit la complexité de la modulation, l'onde en tout point de l'espace sera toujours celle d'une sinusoïde de pulsation $\omega$.

La sinusoïde est donc une fonction très pratique lorsqu'on s'intéresse à la physique des ondes. Mais limiter tous les raisonnements ondulatoires à ce type de signaux est très réducteur. Il existe une physique des ondes bien plus riche en milieu hétérogène avec des sources de modulation temporelle plus sophistiquée *(voir l'article* La complexité : [illegible] porel des ondes *dans ce numéro)*.

***Mathias Fink,***
Institut Langevin, ESPCI ParisTech



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

tions propres » de l'opérateur nommé laplacien et noté Δ, défini à une dimension par $\Delta f = \partial^2 f / \partial x^2$ et complété par les conditions aux limites du problème considéré. On dit que $f$ est une fonction propre de Δ si Δ$f$ est proportionnel à $f$, c'est-à-dire si $\Delta f = \alpha f$, où α est une constante, qualifiée de valeur propre. C'est le cas des fonctions $\sin(k_n x)$, puisqu'elles vérifient :
$\Delta[\sin(k_n x)] = \partial^2[\sin(k_n x)]/\partial x^2 = -k_n^2 \sin(k_n x)$.

Ainsi, les solutions de l'équation de d'Alembert pour la corde de longueur $L$ peuvent s'écrire sous la forme :
$A_1(t) \sin(k_1 x) + A_2(t) \sin(k_2 x) + \ldots$
Une telle somme est un exemple de « séries de Fourier », introduites par Joseph Fourier en 1822, mais dont une théorie satisfaisante n'a vu le jour qu'un siècle plus tard, grâce aux premiers concepts de l'analyse fonctionnelle et à une théorie de l'intégration plus puissante que la précédente. Les séries de Fourier ont d'ailleurs donné naissance à plusieurs branches de l'analyse : l'analyse harmonique, la théorie du signal, celle des ondelettes, etc.

Ces considérations se généralisent à des espaces ou des domaines de dimension supérieure à 1 et permettent d'étudier les vibrations de la peau d'un tambour, d'une plaque métallique, d'un solide plein, etc. En dimension 3, l'équation des ondes de faible amplitude, sans forçage extérieur et limitées à un domaine borné de l'espace, s'écrit ainsi :

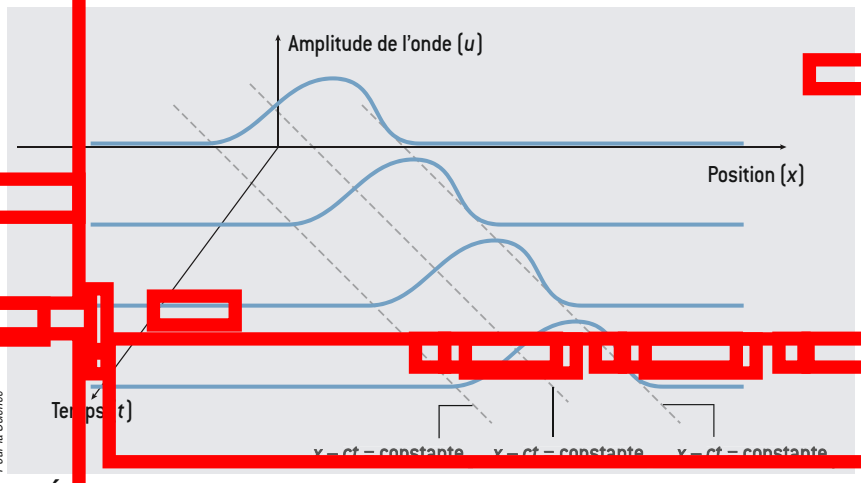
$$\partial^2 u / \partial t^2 - c^2 \Delta u = 0,$$

où le laplacien est défini par :

$$\Delta u = \partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 + \partial^2 u / \partial z^2.$$

Comme en dimension 1, on recherche un ensemble adéquat de fonctions propres $f_n(x, y, z)$ telles que $\Delta f_n = \alpha_n f_n$, où les $\alpha_n$ sont les valeurs propres et où les fonctions $f_n$ vérifient les conditions aux limites imposées. Les solutions possibles de l'équation des ondes sont alors des sommes $A_1(t) f_1(x, y, z) + A_2(t) f_2(x, y, z) + \ldots$ où les $A_n(t)$ sont des fonctions sinusoïdales du temps, avec des pulsations $\omega_n$ données par les valeurs propres ($\omega_n^2 = -c^2 \alpha_n$). Chacun des termes représente un « mode propre d'oscillation » du système et le « spectre » désigne l'ensemble des fréquences possibles.

Soulignons que les fonctions et valeurs propres du laplacien dépendent de la géométrie du problème. La détermination des valeurs propres (le spectre) et l'analyse de leur relation avec cette géométrie ont de nombreuses applications, par exemple à l'étude des instruments de musique, mais aussi au contrôle non destructif, à la physique quantique, à la théorie des nombres, etc.




**4. L'ÉQUATION DE D'ALEMBERT** pour les ondes à une dimension a des solutions de la forme $u(x, t) = f(x - ct)$, où $f$ est n'importe quelle fonction d'une seule variable. Une telle solution représente une onde qui se propage sans se déformer à la vitesse $c$ dans le sens positif sur l'axe Ox.

Une autre remarque concerne le cas où il existe un forçage extérieur (une source extérieure). Cette situation est plus compliquée, mais l'analyse en modes propres reste indispensable et sert de base pour déterminer le comportement du système et étudier les phénomènes de résonance notamment, comme on l'a expliqué plus haut en dimension 1.

## Propagation dans un espace ouvert

Dans ce qui précède, le fait que les oscillations se développent dans un domaine borné sur une longueur $L$ dans le cas de la corde) est essentiel. C'est une contrainte forte sur les fonctions et vecteurs propres du laplacien, et elle détermine une infinité dénombrable (non continue) de modes d'oscillation.

Que se passe-t-il par exemple pour une corde vibrante de longueur infinie ? La recherche de solutions à variables séparées conduit dans ce cas à des solutions du type $A \sin(kx) \cos(\omega t + \phi)$, où $k = \omega / c$ peut prendre n'importe quelle valeur réelle. On a donc une infinité continue de solutions particulières, et un spectre continu de fréquences.

Dans cette situation, les solutions plus générales de l'équation de la corde vibrante ne sont pas des séries de Fourier (des sommes dénombrables de fonctions sinusoïdales), mais des intégrales de Fourier (des sommes continues de fonctions sinusoïdales). L'étude de l'équation des ondes peut être alors effectuée en écrivant sous forme d'intégrales les fonctions recherchées. Cette technique, la transformation de Fourier, s'adapte à de très nombreux problèmes.

Pour la corde vibrante, un calcul simple montre directement un résultat intéressant. On remarque en effet que toute fonction $u(x, t)$ de la forme $f(x - ct)$ ou $g(x + ct)$, où $f$ et $g$ sont des fonctions quelconques d'une seule variable, vérifie *a priori* l'équation des ondes $\partial^2 u / \partial t^2 - c^2 \partial^2 u / \partial x^2 = 0$. Or $f(x - ct)$ représente une onde qui se propage sans se déformer vers la droite à la vitesse $c$, tandis que $g(x + ct)$ représente une onde qui se propage sans se déformer à la vitesse $-c$, c'est-à-dire vers la gauche à la vitesse $c$ *(voir la figure 3)*. La solution générale de l'équation de la corde vibrante est alors une superposition $f(x - ct) + g(x + ct)$ de ces deux ondes voyageant en sens opposés, que l'on peut en principe déterminer complètement si l'on connaît la position et la vitesse de tous les points de la corde à un instant initial.

L'exemple simple de la corde vibrante a mis en évidence deux comportements liés à la notion d'onde : les oscillations dans le cas d'un domaine borné, et la propagation dans le cas d'un domaine infini. Nous avons jusqu'ici considéré l'équation de d'Alembert, qui s'applique à la corde vibrante et à de nombreux autres systèmes. Mais il existe d'autres types d'équations d'onde : l'équation de Schrödinger en mécanique quantique, l'équation d'Airy qui intervient dans l'étude des caustiques (concentrations de lumière), l'équation de la vibration des poutres, etc. Les trois exemples cités sont des

## Ondes, rayons et trajectoires

Comment se comportent les ondes lorsque les fréquences qu'elles décrivent sont très élevées ? Cette question relève de ce qu'on appelle l'analyse asymptotique, où l'on étudie mathématiquement le comportement d'une suite lorsqu'un ou plusieurs de ses paramètres tendent vers des limites intéressantes.

Le cas où la fréquence tend vers l'infini est intéressant notamment parce qu'il concerne les ondes lumineuses. Les fréquences des ondes sinusoïdales permettant de décrire la lumière sont en effet extrêmement élevées : autour de $4 \cdot 10^{14}$–$10^{15}$ hertz, c'est-à-dire autant de cycles d'oscillation du champ électromagnétique par seconde.

Le comportement des ondes à haute fréquence a occupé de nombreux mathématiciens au XX^e^ siècle. L'une des contributions majeures est celle du chercheur suédois Lars Hörmander (médaille Fields en 1962), avec notamment pour l'« analyse microlocale ». L'étude mathématique de la limite des hautes fréquences a justifié de façon rigoureuse le fait que les ondes lumineuses peuvent être considérées comme des rayons si la taille des obstacles est grande par rapport à la longueur d'onde, cette dernière étant d'autant plus courte que la fréquence est élevée. L'optique géométrique, dues à Snell et Descartes, ont ainsi reçu une explication satisfaisante, et des résultats quantitatifs, utiles pour les applications aux radars, aux images de synthèse, etc., sont systématiquement utilisés aujourd'hui.

Un autre exemple important d'analyse asymptotique des ondes est l'étude de l'équation de Schrödinger (une équation fondamentale de la mécanique quantique) quand la constante de Planck $h$ (dont la valeur exacte est petite) tend vers 0. De nombreux travaux mathématiques ont porté sur cette limite semi-classique, et ont permis de préciser dans quel sens le fait de faire tendre $h$ vers 0 permet de retrouver la mécanique classique, et notamment les trajectoires qui n'existent qu'en mécanique classique.

équations linéaires, que l'on peut analyser avec la technique des transformations de Fourier. Cela revient à représenter les solutions comme des intégrales (des sommes infinies) d'ondes sinusoïdales.

L'étude de telles équations d'onde, outre leur intérêt propre, met en évidence un phénomène ondulatoire nouveau par rapport à l'équation de d'Alembert : la dispersion. Cela signifie que les ondes sinusoïdales se propagent à des vitesses différentes, en fonction de la fréquence (ou de la longueur d'onde), ce qui n'était pas le cas avec la corde vibrante. Les composantes sinusoïdales d'une onde finissent alors par se séparer au fil du temps. La dispersion explique par exemple la décomposition par un prisme en verre de la lumière blanche, constituée d'ondes lumineuses de nombreuses fréquences. Elle explique aussi qu'une onde de forme initiale très localisée peut se déformer et s'étaler en se propageant, avec une amplitude qui diminue au fil du temps (même s'il n'y a pas dissipation d'énergie).

Par ailleurs, si les amplitudes des ondes ne peuvent pas être considérées comme petites, les équations qui les décrivent sont non linéaires. C'est fréquemment le cas, et les vagues à la surface de l'eau sont un exemple d'ondes non linéaires (décrites par l'équation dite de Korteweg-de Vries lorsque la profondeur peut être considérée comme faible). Du point de vue mathématique, les équations non linéaires sont plus variées et plus compliquées à analyser, mais elles rendent compte de phénomènes singuliers tels que les ondes de choc (par exemple lorsqu'un avion franchit le mur du son), qui correspondent à des solutions présentant des discontinuités.

Un autre phénomène intéressant décrit par certaines équations non linéaires est l'existence d'« ondes solitaires » ou « solitons » : des perturbations localisées qui se propagent sans déformation sur de longues distances, et dont les mascarets et les tsunamis sont des exemples *(voir l'article* Les vagues en équations *dans ce numéro)*. Les solitons correspondent à des ondes où l'effet de la dispersion est compensé par celui des non-linéarités.

L'étude mathématique des différentes équations d'onde, qu'elles soient linéaires ou non, qu'elles fassent apparaître ou non de la dispersion, est d'une grande richesse et continue à susciter l'invention de concepts et techniques adaptés. Il est rare que des solutions exactes et explicites puissent être trouvées aux équations. Cela arrive tout de même, notamment avec des équations dites intégrables telles que l'équation de Korteweg-de Vries, et une telle propriété révèle souvent des liens avec des domaines mathématiques *a priori* éloignés.

## Un univers foisonnant

Sinon, des calculs approchés sont réalisables et utiles, tant pour l'étude mathématique des problèmes que pour leur interprétation physique. L'analyse dite asymptotique, qui examine ce qui se passe quand certains paramètres ou certaines grandeurs tendent vers des limites données, entre aussi dans ce cadre. Ainsi, l'étude de la limite des hautes fréquences, réalisée au XX^e^ siècle, justifie le fait que les ondes lumineuses peuvent, dans les situations courantes, être assimilées à des rayons décrits par l'optique géométrique *(voir l'encadré ci-dessus)*.

L'univers des ondes est un univers foisonnant. Les ondes interviennent sous une forme ou une autre dans presque tous les phénomènes physiques. Liant oscillation et propagation, avec des effets de dispersion et des non-linéarités qui augmentent d'autant leur complexité et leur richesse, elles sont fondamentales pour les physiciens et les ingénieurs. L'étude des ondes a aussi été un stimulant essentiel de plusieurs champs des mathématiques. Elle l'est toujours.

### BIBLIOGRAPHIE


C. Bardos et M. Zerner, **Équations aux dérivées partielles**, *Encyclopædia Universalis*, 2009.

J. Bruneaux et J. Matricon, **Vibrations, ondes**, Ellipses, 2008.

F. Baskevitch, **Les représentations de la propagation du son d'Aristote à l'Encyclopédie**, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2008.

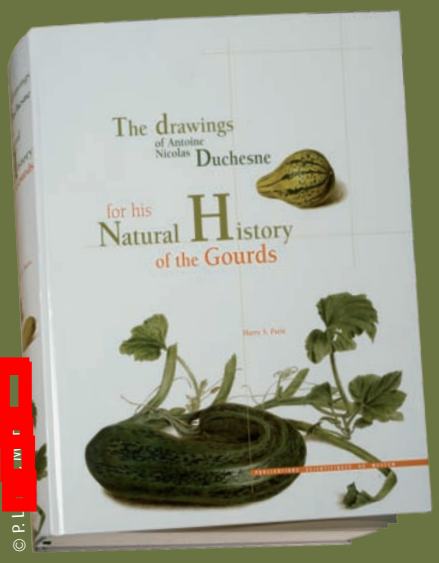
B. Valeur, **Lumière et luminescence**, Belin-Pour la Science, 2005.

R. Knobel, **An Introduction to the Mathematical Theory of Waves**, American Mathematical Society, 2000.

G. B. Whitham, **Linear and Nonlinear Waves**, John Wiley & Sons, 1974.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




*Un livre monument !*

*Stéphane Deligeorges (France Culture)*

*Ce très bel ouvrage [...] permettra de redécouvrir le travail de ce maître jardinier reconnu et admiré par ses pairs, pionnier de la génétique et de l'évolution.*

*Marie-Hélène Loaëc (Jardins de France)*

*Un livre pour collectionneurs, qui permet [...] d'admirer à loisir les sublimes dessins de Duchesne avec leur identification incomparable !*

*Patrick Mioulane (l'Officiel Jardin Motoculture)*

*Quasi une œuvre d'art qui comblera les botanistes, mais aussi les amoureux des potagers et de l'univers fantastique du jardin !*
*Un ouvrage d'anthologie.*

*Paul Valtère (ici Paris)*

*Avec ce nouveau volume [...], non seulement la place de Duchesne dans l'histoire naturelle des courges est finalement reconnue, mais il fait pleinement honneur à son talent de peintre coloriste ainsi qu'à son étonnante intelligence scientifique.*

*Antoine Jacobsohn (Pour la Science)*

*Une œuvre magistrale, patrimoniale et artistique !*

*Joël Avril (France Info)*

**Muséum national d'Histoire naturelle**

Après la publication des Dessins de l'Histoire naturelle des faisiers dans la collection *Des Planches et des Mots*
les Publications scientifiques du Muséum présentent :

# The drawings of Antoine Nicolas Duchesne for his *Natural History of the Gourds*

## Harry S. Paris

Ce volume met pour la première fois à la disposition d'un large lectorat les reproductions en haute définition des 258 dessins de courges du genre *Cucurbita*, illustrant une centaine de cultivars. Conservés à la Bibliothèque centrale du Muséum national d'Histoire naturelle, ils ont été réalisés au XVIII[e] siècle par le talentueux Antoine Nicolas Duchesne, du Jardin du Roi à Versailles, pionnier de la génétique et de l'évolution.
Cet ouvrage bilingue anglais-français, rédigé par le Dr Harry S. Paris, spécialiste reconnu des cucurbitacées, s'adresse certes aux scientifiques (botanistes, généticiens, agronomes, horticulteurs, historiens des sciences) mais aussi à un large public incluant les jardiniers, les amateurs de plantes cultivées et notamment de cucurbitacées. Son grand format (320 mm x 440 mm), la diversité et la somptuosité des planches et la qualité artistique de la présentation ne manqueront pas d'intéresser les bibliophiles.

**ISBN : 978-2-85653-604-9 • 31 octobre 2007 • 454 p. • 129 € TTC**

**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 • www.mnhn.fr

# La complexité : un atout pour le retournement temporel des ondes

Mathias Fink

**Dans certaines conditions, les ondes peuvent remonter le cours de leur vie et se focaliser précisément à l'endroit d'où elles ont été émises. C'est le principe du retournement temporel qui trouve sans cesse de nouvelles applications. La découverte la plus surprenante est que cette focalisation est d'autant plus efficace que le milieu traversé est complexe.**

Contrôler les ondes, c'est-à-dire manipuler leur évolution temporelle et spatiale dans un environnement complexe trouve des applications dans des domaines aussi variés que la médecine, les télécommunications, la sismologie, la domotique, l'aviation, etc. Les premières techniques de contrôle des ondes ont été mises au point en optique : c'est le domaine de l'optique adaptative utilisée pour améliorer la qualité des images des étoiles qui arrivent sur Terre dégradées par la turbulence de l'atmosphère ou pour focaliser des faisceaux de lumière très intense à travers l'atmosphère. En utilisant des miroirs déformables, on parvient à gommer ces perturbations et à optimiser la focalisation et la qualité des images.

Curieusement, la complexité des milieux où se propagent les ondes n'est pas forcément un obstacle. Au contraire, nous allons examiner comment, dans certains milieux de propagation complexes, la qualité de la focalisation des ondes peut devenir bien meilleure que dans les milieux simples. C'est le cas des ondes focalisées par retournement temporel, c'est-à-dire ayant subi une opération après laquelle elles reviennent à leur point de départ, comme si l'on passait le film de leur propagation à l'envers. C'est le domaine des miroirs à retournement temporel, qui permettent de faire revivre à une onde toutes les étapes de sa vie passée.

Nous nous intéresserons à des milieux de propagation tellement complexes qu'une impulsion ondulatoire est déformée au cours de sa propagation au point que le signal reçu par un récepteur lointain ne ressemble en rien au signal émis par la source ; on qualifie ces milieux de dispersifs. On est confronté à ce type de difficulté par exemple, quand un téléphone portable émet une impulsion électromagnétique très brève. Cette dernière est perçue dix rues plus loin comme un train d'impulsions correspondant à une superposition de nombreuses impulsions élémentaires provenant des multiples chemins parcourus par le signal entre la source et le récepteur : l'onde s'est réfléchie sur de nombreux obstacles, donnant naissance à autant de signaux secondaires.

C'est le cas pour les ondes acoustiques subissant des réverbérations, mais aussi pour les ondes lumineuses, notamment pour des impulsions de lumière ultrabrèves qui se propagent dans un milieu diffusant (diffusant pour les physiciens de l'optique et diffuseur pour les acousticiens), tel le corps humain.

Comment parvient-on à traiter de tels signaux ? Après avoir rappelé le principe du retournement temporel, nous examinerons en quoi un milieu diffusant peut se révéler être un atout plutôt qu'une gêne, et nous évoquerons quelques-unes des applications possibles de ce principe.

## Remonter le temps

Comment fonctionnent les miroirs à retournement temporel ? C'est d'abord en acoustique (sonore et ultrasonore) que ces techniques de manipulation d'ondes ont été mises au point dans les années 1990, car les faibles fréquences d'oscillation de ces ondes (de quelques kilohertz à quelques mégahertz) étaient alors compatibles avec la vitesse de stockage des informations dans les mémoires électroniques disponibles. Puis ces composants électroniques sont devenus si rapides que l'on a pu appliquer ces méthodes aux micro-ondes électromagnétiques utilisées dans les télécommunications et aux ondes radars (atteignant le domaine des gigahertz). Enfin, récemment, la possibilité de mesurer et de contrôler la modulation temporelle et spatiale d'ondes optiques a permis de réaliser les premières expériences de contrôle de la lumière à travers des milieux diffusants.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Ces dispositifs exploitent tous le fait que la propagation des ondes dans un milieu non dissipatif est un processus réversible. Une onde rayonnée par une source subit de nombreuses distorsions au cours de sa propagation dans un milieu complexe, dues aux phénomènes de réfraction, de diffusion multiple ou encore de réverbération. Toutefois, quelles que soient ces distorsions, il existe toujours – du moins en théorie – une onde duale capable de parcourir en sens inverse tous les chemins complexes suivis par l'onde incidente, et qui converge exactement à la source.

Or un miroir à retournement temporel constitué d'un réseau d'antennes réversibles (alternativement réceptrices et émettrices) entourant complètement la source est capable de créer physiquement cette onde duale. Pour ce faire, à chaque antenne est associé un dispositif qui transforme un signal (qu'il s'agisse d'une onde lumineuse ou d'une onde acoustique) en signaux numériques, lesquels sont traités dans des mémoires numériques pour réaliser l'opération de retournement temporel. Par exemple, en acoustique, un miroir à retournement temporel idéal est une surface fermée tapissée de composants piézo-électriques qui jouent alternativement le rôle de microphones et celui de haut-parleurs (*voir la figure 1*). Les signaux émis par la source sont enregistrés, puis, durant l'étape de retournement temporel, tous ces signaux mémorisés sont « relus » en inversant la chronologie des signaux reçus par chaque microphone : les derniers arrivés sont les premiers relus, et *vice versa*. Durant la seconde étape, tous les microphones passent, de façon synchrone, en mode haut-parleur, et sont alimentés par les signaux « retournés temporellement » provenant des mémoires électroniques. Notons que la même opération peut être réalisée avec des ondes électromagnétiques en remplaçant les transducteurs piézo-électriques par des antennes, telles celles utilisées par exemple en téléphonie mobile.

On réalise ainsi de nouvelles conditions initiales de rayonnement, et du fait de la réversibilité, l'onde ainsi rayonnée revient à son point de départ. Toutefois, si l'onde remise par le miroir à retournement temporel converge parfaitement à l'endroit de la source initiale, elle ne s'y arrête pas et elle repart nécessairement en sens inverse sous forme d'une onde divergente. Si l'onde utilisée dans l'expérience est sinusoïdale, on observe alors qu'autour du point source se crée une interférence constructive entre ces deux ondes

## L'ESSENTIEL

- Les ondes émises par une source ponctuelle peuvent subir un retournement temporel, une opération qui leur fait revivre à l'envers le film de leur vie.
- Cette opération nécessite normalement de nombreuses antennes, qui sont alternativement réceptrices ou émettrices. Dans certains cas, un seul de ces éléments suffit.
- De surcroît, l'opération est d'autant plus efficace que le milieu où se propagent les ondes est complexe.
- Les applications possibles du retournement temporel se développent, par exemple dans les télécommunications.
- En milieu complexe, la précision (ou limite de résolution) est bien meilleure que celle autorisée par d'autres méthodes.

© Shutterstock

L'AUTEUR

Mathias FINK est professeur de physique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI-ParisTech). Il y dirige l'Institut Langevin-Ondes et images.

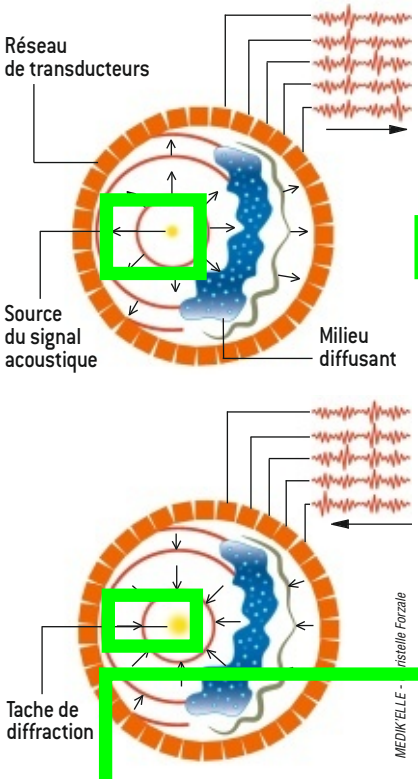
sur une zone dont la taille est égale à λ/2, pour une longueur d'onde λ. Ainsi, au lieu de restituer exactement l'image de la source ponctuelle, il se crée une tache dite focale : c'est cette limite de diffraction qui interdit de reconstruire des images parfaites des objets sources *(voir* Lumière sur l'infiniment petit, *page 50)*.

Plus intéressant encore, à cette focalisation spatiale s'ajoute une refocalisation temporelle dans le cas où la source a émis un signal bref à large spectre (qui résulte de la superposition de nombreuses sinusoïdes de longueurs d'onde différentes) dans un milieu dispersif : malgré la dispersion du milieu, l'onde retournée temporellement retrouve exactement sa durée initiale, à l'endroit où elle avait été émise. On obtient ainsi une compression spatio-temporelle d'énergie au point source.

## De surprise en surprise

Dans le schéma envisagé jusqu'à présent, la source était totalement entourée d'antennes, ce qui n'était pas très réaliste. Il fallait de très nombreux transducteurs disposés dans toutes les directions de l'espace en regard de la source. En pratique, on se restreint à des miroirs à retournement temporel qui n'ont qu'une ouverture angulaire limitée (donnée par le rapport entre la taille du miroir et sa distance à la source). En testant de tels miroirs dans le domaine ultrasonore, nous n'imaginions pas qu'une excellente surprise nous attendait. Nous avons constaté que, pour des signaux brefs à spectre large, le nombre de transducteurs nécessaires pour refocaliser efficacement une onde diminue quand le milieu où les ondes se propagent est complexe. Autrement dit, bien qu'elles subissent des diffusions multiples dues aux obstacles ou des réverbérations contre les parois, le nombre de transducteurs nécessaires au retournement temporel diminue au point que, dans bien des cas..., un seul transducteur suffit !

Dans ces conditions, bien que le miroir à retournement temporel soit très petit, il est capable de réaliser des taches focales dont la dimension est toujours de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Cet effet a été observé dans les scénarios les plus différents : la propagation d'ultrasons de longueur d'onde millimétrique sur des distances de plusieurs mètres, la propagation d'ondes sonores en mer sur plusieurs



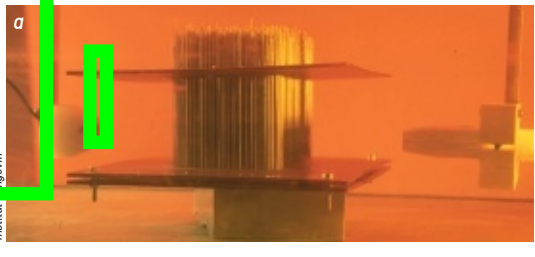

**1. LE SIGNAL SONORE** émis par la source est capté par les transducteurs qui entourent la source, et mémorisé *(en haut)*. Puis tous ces signaux sont réémis dans une chronologie inversée et l'onde ainsi créée se refocalise sur la source initiale *(en bas)*. Cependant, cette onde parfaitement convergente ne s'arrête pas au point source et donne lieu à une nouvelle onde divergente, ce qui entraîne l'apparition d'une tache de diffraction autour de la source.

Pour étudier la propagation d'un paquet d'ondes ultrasonores à travers un milieu diffusant de structure aléatoire, nous avons immergé un petit miroir à retournement temporel de 40 millimètres de longueur formé de 96 transducteurs ultrasonores placés dans une cuve remplie d'eau *(a)*. Ce miroir fonctionne autour d'une fréquence centrale de trois mégahertz (la longueur d'onde est de l'ordre de 0,5 millimètre). Entre ce miroir et une très petite source d'ultrasons, on a disposé, de grande largeur, formé de 200 tiges de métal qui résonnent autour de trois mégahertz.

Dans la première phase de l'expérience, la source ponctuelle émet un signal ultrasonore très bref, qui dure une microseconde. Ce train d'ondes ultrasonores se propage à travers la forêt des tiges, qui le modifient. La plus grande partie de l'onde initiale se divise en de très nombreuses ondelettes à chaque collision avec les tiges. Le processus peut se répéter de nombreuses fois et, à la sortie du milieu, on obtient un signal ultrasonore très long (200 microsecondes) et bruité aléatoire *(b)*. Les 96 transducteurs enregistrent ces signaux dont la durée est de l'ordre de 200 microsecondes.

Après renversement du temps dans les mémoires électroniques, les 96 bruits acoustiques sont réémis dans le milieu. On observe alors le signal ultrasonore qui se propage à travers l'ensemble des tiges, et on constate qu'à l'emplacement initial de la source initiale, le signal ultrasonore dure maintenant une microseconde, c'est-à-dire qu'il a exactement retrouvé sa durée initiale *(c)*.

Par ailleurs, la taille de la tache focale obtenue à travers le milieu diffusant, ici la forêt de tiges, est beaucoup plus petite que celle observée dans une expérience de retournement qui serait effectuée en milieu homogène de l'eau uniquement. Dans l'expérience effectuée en milieu homogène, on retrouve le résultat classique : la taille de la tache focale dépend de l'angle sous lequel le miroir est vu du point focal). En présence du milieu diffusant, c'est maintenant, après retournement



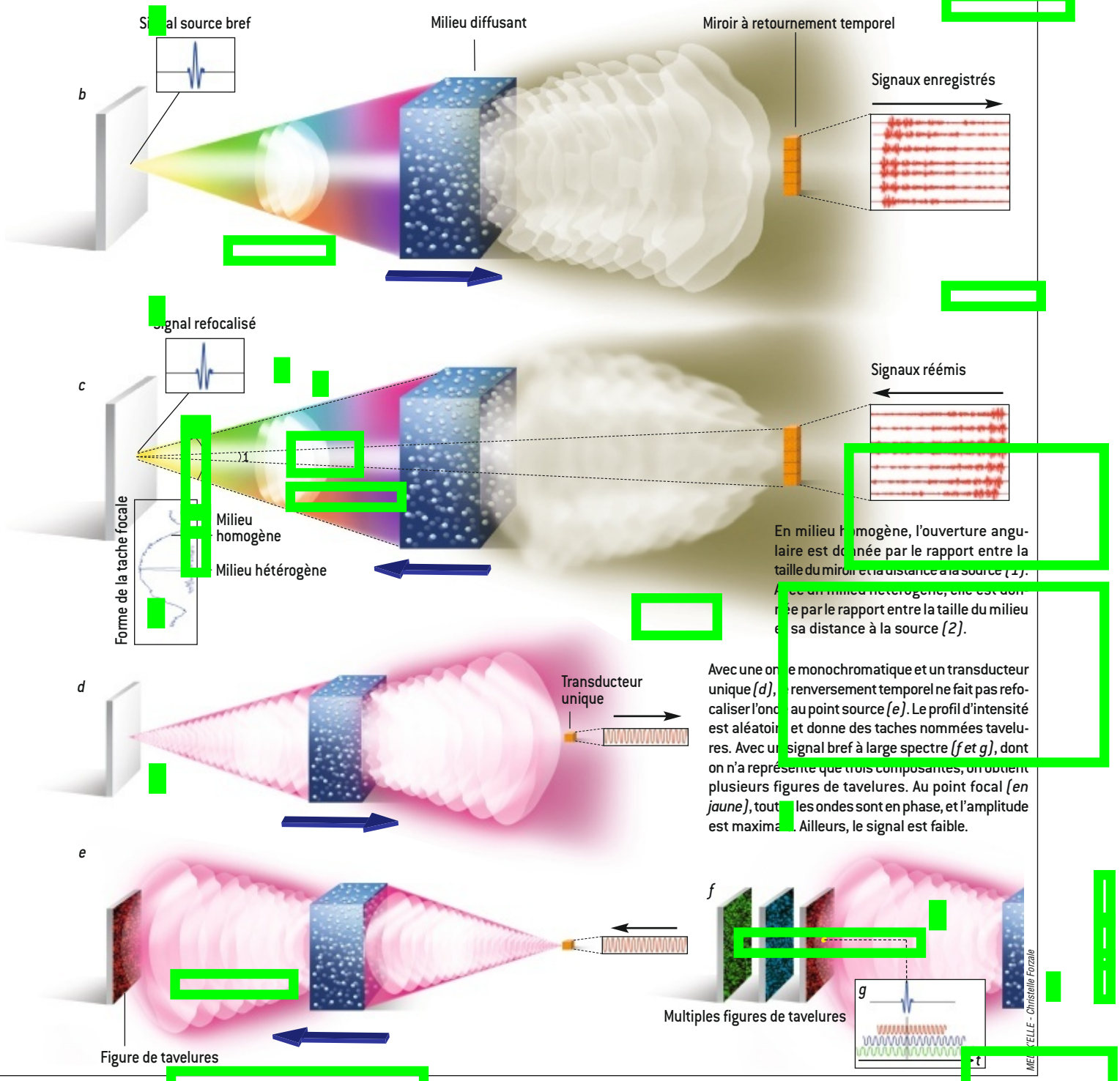



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

temporel, l'ensemble des tiges du milieu qui devient la source d'un rayonnement cohérent focalisant sur le point initial : c'est donc cette nouvelle ouverture angulaire qui fixe la taille de la tache focale, et non plus la taille du miroir. Pour la géométrie de notre expérience, la résolution est améliorée d'un facteur 35 quand on passe de l'eau à notre forêt de tiges métalliques, parce que l'ouverture angulaire est 35 fois plus grande. Enfin, pour des impulsions ultrabrèves, un seul [illegible] suffit pour obtenir une tache focale de même dimension.

Au contraire, quand l'expérience est réalisée avec une onde monochromatique et un seul transducteur *(d)*, on constate que l'onde ne refocalise pas après retournement temporel *(e)*. Une [illegible], par exemple, donne ce que l'on [illegible] *(écran rouge)*.

Dans le cas d'un signal bref constitué de plusieurs longueurs d'onde *(ici rouge, verte et bleue)*, on observe de multiples figures de tavelures différentes *(f)*. Les composantes spectrales ne refocalisent pas au point source, mais elles [illegible] point seulement *(g)*, de sorte que le signal y est très intense à un instant particulier, le temps focal.




En milieu homogène, l'ouverture angulaire est donnée par le rapport entre la taille du miroir et la distance à la source *(1)*. Avec un milieu hétérogène, elle est donnée par le rapport entre la taille du milieu et sa distance à la source *(2)*.

Avec une onde monochromatique et un transducteur unique *(d)*, le renversement temporel ne fait pas refocaliser l'onde au point source *(e)*. Le profil d'intensité est aléatoire et donne des taches nommées tavelures. Avec un signal bref à large spectre *(f et g)*, dont on n'a représenté que trois composantes, on obtient plusieurs figures de tavelures. Au point focal *(en jaune)*, toutes les ondes sont en phase, et l'amplitude est maximale. Ailleurs, le signal est faible.

MEDIATHÈQUE - Christelle Forzale

© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

centaines de kilomètres ou encore la propagation d'ondes électromagnétiques centimétriques sur plusieurs kilomètres. Cela est rendu possible par le fait qu'un miroir à retournement temporel apparaît, dans un environnement complexe, beaucoup plus grand qu'il ne l'est en réalité. Ce n'est pas la taille du miroir qui fixe la résolution spatiale, mais les propriétés du milieu où

## Un milieu dispersif plus efficace qu'un milieu homogène

De nombreuses expériences ont confirmé ce résultat surprenant. Une première expérience, réalisée en 1994 dans notre laboratoire avec Arnaud Derode, illustre ce concept. Pour ce faire, nous avons immergé un miroir à retournement temporel formé de 96 transducteurs dans une cuve d'eau. Nous avons modifié les propriétés du milieu en y plaçant un réseau aléatoire de 2 000 tiges métalliques qui diffusent les ondes ultrasonores émises par la source.

Dans le cas d'un signal initial bref (une microseconde), le signal observé à la sortie du milieu diffuseur a une allure totalement aléatoire et s'étale sur une durée de l'ordre de 200 microsecondes. Pourtant, après renversement du temps, on constate que le signal ultrasonore, qui s'est propagé en sens inverse à travers l'ensemble des tiges, retrouve sa durée initiale à la source et refocalise sur une tache focale qui ne dépend pas de la taille du miroir *(voir l'encadré page 33)*.

Plus étonnant encore, on peut réduire le nombre d'éléments du miroir en passant de 96 éléments à un unique élément, formant ainsi un miroir à retournement temporel quasi ponctuel. La tache focale conserve la même dimension, mais présente davantage de pics d'intensité parasites de part et d'autre du pic d'intensité maximale.

Comment se fait-il alors que le signal ultrasonore quasi aléatoire émis par un unique transducteur à retournement temporel refocalise à travers un milieu diffusant, alors que ce serait impossible si l'expérience avait été faite non plus avec un signal bref à large spectre, mais avec un signal sinusoïdal (une longueur d'onde unique) ? Renverser le sens du temps revient pour une onde sinusoïdale (décrite par son amplitude et sa phase) à remplacer sa phase Φ par son opposé, –Φ. Or, quelle que soit sa phase, une onde sinusoïdale (monochromatique) émise par une source de très petite taille (une onde sphérique divergente) ne focalise jamais en traversant un milieu diffusant.

Au contraire, elle donne lieu, après la traversée d'un tel milieu, à un champ dont l'intensité, dans le plan d'observation, a un profil aléatoire, caractérisé par des figures de tavelures, c'est-à-dire des taches réparties au hasard. La taille des taches de tavelures dépend de la longueur d'onde et de la taille du milieu diffusant. Ce sont les analogues des franges qui résultent de l'interférence de deux ondes planes, mais ici il s'agit de l'interférence de très nombreuses ondes de phase et d'amplitude quelconques. Ainsi, une antenne unique à retournement temporel ne permet pas de refocaliser une onde monochromatique : pour focaliser des ondes monochromatiques, il faut de nombreuses antennes et donc un grand miroir à retournement temporel.

Pourquoi avec un signal à large spectre une unique antenne suffit-elle ? Quand on utilise un rayonnement initial très bref qui se propage à travers un milieu diffusant, le signal capté par l'antenne dure longtemps et son spectre est large. Dans l'opération de retournement temporel, bien qu'aucune des composantes spectrales ne refocalise à la source, elles y arrivent toutes en phase. Dès lors, au point source, toutes les sinusoïdes de fréquences différentes et d'amplitudes quelconques ont la même phase, ce qui donne un signal très intense à un instant particulier : c'est le temps focal.

En revanche, pour les points situés en dehors de la source (à partir de la tache de tavelure la plus proche), les composantes spectrales arrivent avec des phases suffisamment différentes pour que leur superposition donne des signaux faibles. Le rapport entre l'amplitude au point focal et celle dans la tache de tavelure la plus proche caractérise l'efficacité de ce processus de focalisation.

Il dépend du nombre de figures de tavelures indépendantes (elles ne se ressemblent pas, et sont qualifiées de décorrélées) présentes dans le spectre émis par la source. Dans notre expérience, il y a 200 figures de tavelures indépendantes correspondant à des fréquences différentes. On dit que le signal temporel capté par une antenne contient 200 degrés de liberté fréquentiels.

## BIBLIOGRAPHIE


F. Lemoult *et al.*, **Acoustic resonators for far-field control of sound on a subwavelength scale**, *Physical Review Letters*, vol. 107, article 064301, 2011.

G. Lerosey *et al.*, **Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal**, *Science*, vol. 315, pp. 1 120-1 122, 2007.

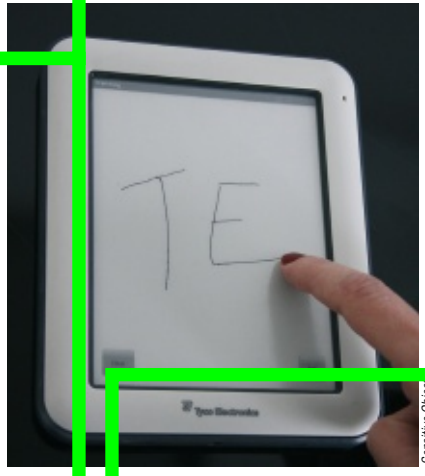
R. Kyng *et al.*, **In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process**, *Applied Physics Letters*, vol. 87(20), Article 204104, 2005.

M. Fink *et al.*, **Time-reversal acoustics in biomedical engineering**, *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. , pp. 465-497, 2003.

G. Edelmann *et al.*, **An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal**, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 27, pp. 602-609, 2002.

M. Fink *et al.*, **Time-reversed acoustics**, *Reports on Progress in Physics*, vol. 63, n° 1, pp. 1 933-1 995, 2000.

A. Derode *et al.*, **Robust acoustic time reversal with high order multiple scattering**, *Physical Review Letters*, vol. 75, n° 23, pp. 4 206-4 209, 1995.

Sensitive Object

**2. N'IMPORTE QUEL SUPPORT,** y compris un support en bois, peut, grâce au retournement temporel, devenir une tablette tactile. L'impact d'un doigt sur une tablette ou le bruit qu'il fait en se déplaçant sur la surface produit une onde élastique qui se réverbère dans l'objet et qui est captée par un transducteur. Ce signal est comparé à une banque de signaux préalablement mémorisés. On reconstruit ainsi, « pixel » par « pixel », la trajectoire du doigt ou sa position sur la tablette.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Cela revient à dire que cette unique antenne à 200 degrés de liberté fréquentiels est capable de focaliser un signal à large spectre avec la même qualité que 200 antennes réparties dans l'espace qui fonctionneraient avec une unique fréquence (monochromatique).

Ainsi, une seule antenne exploitant une large diversité de fréquences, et donc beaucoup de degrés de liberté fréquentiels, est suffisante pour focaliser un rayonnement ayant traversé un milieu diffusant. À chaque point de l'espace correspond un signal temporel unique. Une fois connu l'ensemble des signaux correspondant à tous les points d'une zone, on peut soit focaliser sur chacun des points, soit utiliser cette banque de signaux pour localiser des sources quelconques ou pour faire l'image d'une source complexe à partir du signal enregistré par une unique antenne.

## Cavités et autres pièges

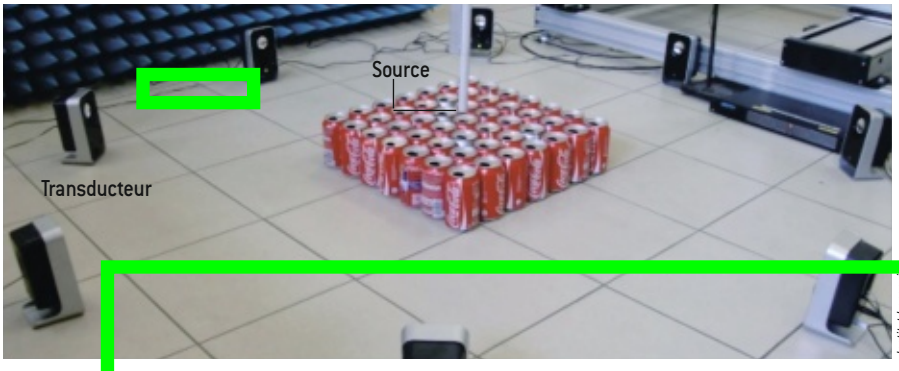
Le succès des techniques de retournement temporel tient du fait qu'il existe de nombreuses situations dans la vie courante où l'on observe le même type d'effet que dans les milieux diffusants. C'est le cas chaque fois qu'une onde se propage dans un milieu entouré de parois réfléchissantes. On est alors dans une situation analogue à celle qui se produit dans un kaléidoscope, où un petit objet semble se répéter de façon périodique selon certaines directions. De même, pour un observateur situé au sein d'une cavité réfléchissante ou à l'intérieur des parois d'un guide d'ondes, chaque transducteur d'un petit miroir à retournement temporel apparaît comme accompagné d'une multitude de transducteurs virtuels créés par les parois réfléchissantes. On a ainsi l'impression d'avoir un grand miroir à retournement temporel formé de beaucoup de transducteurs.

En 2002, William Kuperman et ses collègues de l'Institut américain de recherche SCRIPPS ont observé cet effet spectaculaire en mer. Ils ont conçu un miroir acoustique à retournement temporel de 9 mètres de longueur, formé de 29 transducteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de trois kilohertz (soit à une longueur d'onde de 50 centimètres). Ils l'ont immergé au large de l'île d'Elbe dans une zone où la profondeur est de l'ordre d'une centaine de mètres. En modulant le signal envoyé par le miroir à retournement temporel, ils ont focalisé un message sonore à dix kilomètres de distance qui n'était capté que par un plongeur situé à l'emplacement de la tache focale ! Cette technique a donné lieu à de nombreux développements dans le domaine des communications sous-marines et récemment une équipe japonaise a réalisé des communications sur plus de 1 000 kilomètres par retournement temporel.

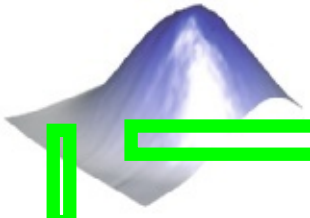
Peut-on conserver une bonne focalisation en réduisant les 29 transducteurs du miroir à retournement temporel à un unique transducteur ? Pas si l'on reste dans la mer, qui se comporte comme un guide d'ondes acoustiques dans lequel les ondes sont réverbérées entre le fond de la mer et la surface de l'eau, mais peuvent « fuir » latéralement. En effet, un guide d'ondes présente peu de degrés de liberté fréquentiels. La solution consiste à travailler avec une cavité fermée, où les ondes sont piégées. On sait qu'un champ ondulatoire enfermé dans une cavité peut toujours s'écrire comme la superposition d'un certain nombre de « modes de vibration » dont les fréquences sont parfaitement définies. Pour chaque mode, tous les points du milieu vibrent avec la même fréquence temporelle, mais avec des phases et des amplitudes différentes.

Certains points vibrent avec une certaine phase, d'autres en opposition de phase. Les points situés aux nœuds des modes ne vibrent pas du tout, alors que ceux situés aux ventres vibrent beaucoup. À chaque mode est associée une figure de vibration et la distance la plus petite entre un nœud et un ventre est égale à la demi-longueur d'onde des ondes acoustiques vibrant à la fréquence du mode. Par ailleurs, deux modes de fréquences différentes ont des figures d'oscillations indépendantes qui sont les analogues de deux figures de cavelures décorrélées.

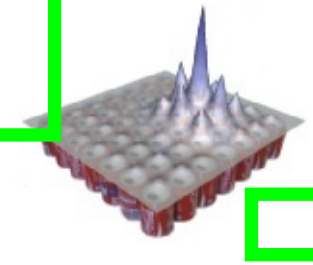
Si une source unique, située dans une cavité au point A, émet une impulsion brève à large spectre, elle peut exciter de nombreux modes de cette cavité, et un simple transducteur situé en un point quelconque B de la cavité peut servir de miroir à retournement temporel. Au point B, le transducteur mesure un signal, superposition de tous les modes produits par le point A, qui s'étale sur un temps très grand. Après retournement temporel, le signal est réémis dans la cavité et refocalise au point A. La refocalisation spatio-temporelle sera d'autant plus




Tache focale sans les canettes



Tache focale avec les canettes



**3. UN « CRISTAL » DE 49 CANETTES DE SODA** peut osciller suivant 49 modes de vibration différents dont les fréquences s'étalent entre 340 et 420 hertz, alors qu'une canette isolée oscille à 420 hertz. Quand l'une des canettes reçoit un signal acoustique de quelques millisecondes, tous les modes du cristal sont excités et des transducteurs éloignés reçoivent la superposition de ces modes. Après retournement temporel, le signal se concentre sur l'unique canette où était située la source. La [illegible]

efficace que le nombre de modes excités par la source est grand. Quant à la dimension de la tache focale, elle est de l'ordre de la plus petite distance qui sépare un nœud d'un ventre des différents modes, c'est-à-dire de la demi-longueur d'onde des fréquences les plus élevées du spectre.

Une application de cette expérience touche la cinématique : elle permet de transformer un objet solide quelconque (une table, une porte, un vase, un mur, etc.) en un clavier intelligent. Imaginons l'impact d'un doigt sur la surface d'un objet, qui, s'il n'est pas trop grand, se comporte comme une cavité. Il produit une onde élastique qui pénètre dans l'objet et s'y réverbère. L'enregistrement de cette signature sonore, sur un temps long, par un unique transducteur, contient toute l'information pour localiser la source de l'impact. Comme on l'a évoqué, un retournement temporel refocaliserait ce signal sur sa source. Pour réaliser un clavier tactile, on divise la surface de l'objet en points d'impact élémentaires dont on enregistre, dans une phase d'apprentissage, les signatures temporelles acoustiques. Puis, quand on tape à un endroit de l'objet, on compare la signature de cet impact à la banque des signatures mémorisées.

Cela revient à réaliser mathématiquement, dans l'ordinateur, l'opération de retournement temporel, et permet d'obtenir des objets tactiles très pratiques. Non seulement on peut réaliser des claviers à touches virtuelles, mais la technique est aussi applicable quand un doigt se déplace sur une surface. Le doigt crée, en glissant, un bruit de frottement qui permet de suivre la trajectoire : le doigt devient ainsi une souris d'ordinateur. Une jeune entreprise, *Sensitive Object*, créée par Ros Kiri Ing, un des chercheurs de notre laboratoire, a connu un grand succès et a été récemment rachetée par une grande société américaine, *Tyco-Electronics*, et développe de telles tablettes tactiles.

## Des résonateurs couplés pour la super-résolution

Les exemples précédents montrent qu'un milieu diffusant ou des parois réfléchissantes permettent à une petite antenne de se transformer en une lentille spatio-temporelle capable de focaliser pendant un temps bref des signaux sur une dimension de l'ordre de la longueur d'onde. Est-il possible d'utiliser le même principe pour descendre au-dessous de la longueur d'onde ? On peut effectivement y parvenir, mais, pour ce faire, il ne faut pas que la source sur laquelle on veut focaliser le faisceau soit située dans un milieu homogène : c'est la source elle-même qui est placée dans un milieu hétérogène.

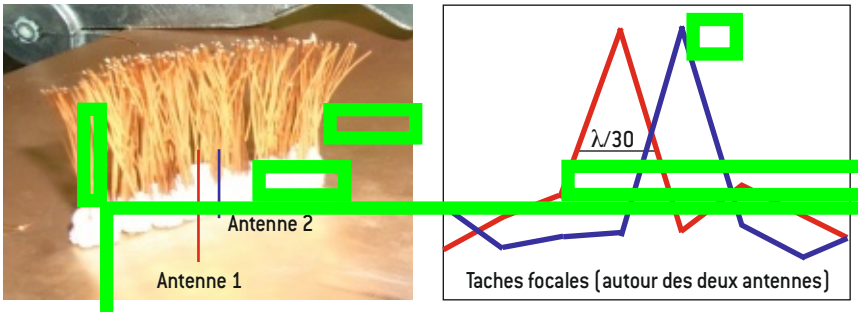
Ce milieu qui entoure la source doit créer un spectre de modes dont les échelles d'oscillations spatiales sont bien inférieures aux longueurs d'onde utilisées. Pour obtenir un tel résultat, il faut un milieu formé d'une collection de petits résonateurs fortement couplés entre eux. Ces résonateurs doivent avoir des dimensions beaucoup plus petites que la longueur des ondes qui les mettent en résonance. On parle de résonateurs sublongueur d'onde qui, du fait de leur petite dimension, peuvent être disposés en nombre dans une zone petite comparée à la longueur d'onde. Ils sont répartis soit de façon désordonnée soit de façon périodique.

On réalise alors une structure (une sorte de métamatériau) qui ressemble à une grosse molécule formée d'atomes identiques couplés entre eux ou à un petit morceau de cristal. On sait qu'un atome se comporte comme un résonateur qu'excitent les photons de fréquences données. La longueur d'onde de ces photons excitateurs est bien supérieure à la taille de l'atome. Lorsqu'on étudie une molécule formée de plusieurs atomes couplés, on observe un spectre de modes de résonance plus riche que celui d'un atome particulier et à chaque fréquence correspond une structure spatiale spécifique d'oscillation des atomes (un mode de vibration des atomes).

L'échelle spatiale des oscillations de ces modes peut être aussi petite que la distance entre deux atomes voisins, qui, ici, est bien inférieure à la longueur d'onde. Dès lors, on comprend qu'une antenne à large bande (utilisée pour le retournement temporel) capable d'exciter de nombreux modes sublongueur puisse créer des concentrations de lumière ou d'énergie mécanique sur des taches focales dont la taille sera inférieure à la longueur d'onde. Plus le nombre de résonateurs couplés est grand, plus l'effet est spectaculaire.

Nous avons réalisé les premières démonstrations de ce principe dans le domaine des micro-ondes et des ondes acoustiques, avec Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Fabrice Lemoult et Arnaud Tourin, à l'Institut Langevin. Dans la première expérience, nous nous sommes intéressés à la focalisation d'ondes électromagnétiques du type micro-ondes utilisées en télécommunication dans la bande Wi-Fi. La fréquence centrale d'utilisation est égale à 2,4 gigahertz correspondant à une longueur d'onde de 12 centimètres.

La source de rayonnement utilisée est un petit fil de cuivre que l'on insère au sein d'une structure faite de centaines de petits fils de cuivre répartis latéralement de façon aléatoire, mais très proches les uns des autres. Ces fils ont tous la même longueur choisie pour résonner à 2,4 gigahertz. En se couplant entre eux, ils créent un spectre de modes collectifs très riches qui contient de nombreuses fréquences




Institut Langevin

**4. DE NOMBREUX PETITS FILS DE CUIVRE** (résonateurs électromagnétiques), de même taille, sont répartis de façon aléatoire sur un support. Leur couplage crée un ensemble très riche de modes collectifs d'oscillations. Ces modes sont excités par une impulsion électromagnétique émise par une petite antenne *(rouge ou bleue)* insérée au cœur de la structure. Une antenne située à grande distance reçoit un signal complexe, la superposition de tous les modes excités. Une opération de retournement temporel et de réémission permet de refocaliser l'onde sur sa source, mais avec une tache focale de taille millimétrique (λ/30, *figure de droite*), soit quatre millimètres. Cela signifie qu'une antenne éloignée peut envoyer des messages distincts focalisés sur chacune des deux antennes proches.

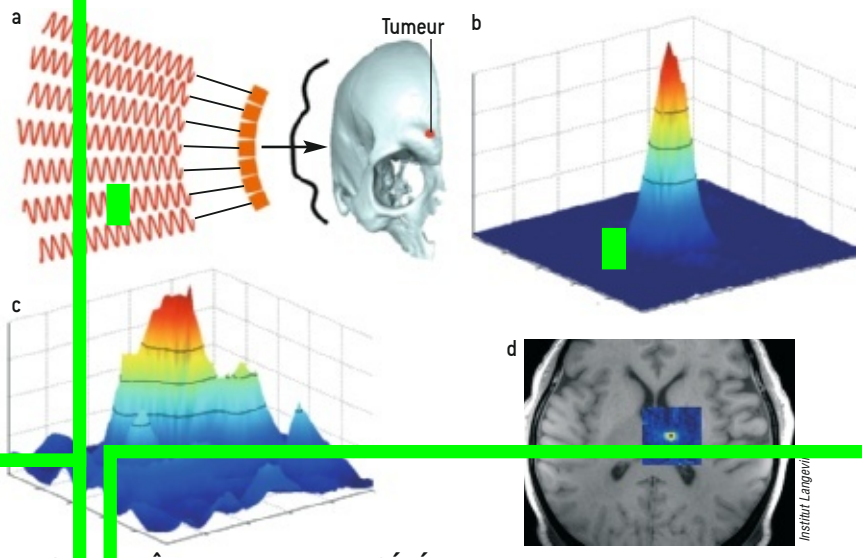

© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

s'étalant de quelques centaines de mégahertz à 2,4 gigahertz. Après émission par la source au sein de cette structure d'une impulsion à large spectre durant dix nanosecondes, une antenne située en champ lointain reçoit un signal très long qui résulte de la superposition de tous les modes excités. Un retournement temporel de ce signal électromagnétique suffit à refocaliser à la source, mais la tache focale mesurée a alors une dimension égale à un trentième de la longueur d'onde ($\lambda/30$). Elle résulte de la superposition cohérente de tous les modes sublongueur d'onde régénérés par le retournement temporel et qui oscillent sur des dimensions de l'ordre de la distance entre deux fils, de l'ordre du millimètre.

Disposer de taches focales de dimension millimétrique dans le domaine des télécommunications est intéressant, car, en plaçant plusieurs antennes séparées de quelques millimètres au sein du milieu de résonateurs, on peut envoyer des messages différents focalisés sur chacune des antennes du milieu à partir d'une ou de plusieurs antennes situées en champ lointain. On peut ainsi exploiter la complexité du milieu pour augmenter la quantité d'information reçue dans un volume donné. La Société *Time Reversal Communications* a été créée pour exploiter ces idées dans le domaine des télécommunications discrètes et sécurisées à très haut débit.

Ce même principe de focalisation sublongueur d'onde s'applique aussi en acoustique. G. Lerosey et F. Lemoult ont choisi de l'illustrer en fabriquant un petit « cristal » constitué de 49 canettes de soda vides *(voir la figure 3)* ! On sait qu'en acoustique on peut fabriquer des résonateurs sublongueur d'onde, dits de Helmoltz. Ces canettes cylindriques trouées sont des résonateurs dont le diamètre est égal à 6,6 centimètres et qui résonnent à 420 hertz, ce qui correspond à une longueur d'onde dans l'air de 80 centimètres.

En fabriquant une « structure cristalline » de sept canettes sur sept, on réalise un milieu qui peut vibrer selon 49 modes d'oscillation différents, dont les fréquences s'étalent de 340 à 420 hertz. En utilisant une émission acoustique brève de dix millisecondes centrée sur 400 hertz et localisée juste au-dessus d'une canette, on observe en champ lointain une onde sonore résultant de la superposition de tous les modes. La refocalisation par retournement temporel est, comme avec




**5. POUR « BRÛLER » UNE TUMEUR CÉRÉBRALE,** on y focalise des ultrasons intenses. Pour cela, on pourrait utiliser un retournement temporel *(a)*, mais cela imposerait d'implanter un émetteur situé à l'endroit de la tumeur. Pour éviter cela, on utilise une méthode virtuelle de retournement temporel. Connaissant l'image tridimensionnelle du crâne, on construit un modèle de propagation d'une onde ultrasonore dans le cerveau et l'on simule une multitude de retournements à partir de n'importe quel point du cerveau. La méthode permet de focaliser les ondes de façon précise *(b)*. Sans corrections des aberrations dues au crâne, l'onde ne focalise pas *(c)*. La méthode, testée sur l'animal, permet d'élever la température des cellules tumorales jusqu'à 65 °C *(le point rouge)*, ce qui les détruit.

des micro-ondes, très efficace et on refocalise l'onde sonore sur une tache focale dont la dimension est de l'ordre de $\lambda/25$.

Les applications des miroirs à retournement temporel se multiplient, entre autres dans le domaine médical, dans le traitement de certaines tumeurs cérébrales par ultrasons focalisés. Avec cette méthode, il s'agit de focaliser des ultrasons de grande intensité pendant plusieurs secondes à travers la boîte crânienne en corrigeant les aberrations de la propagation dues à l'os.

## Retournement temporel dans le cerveau

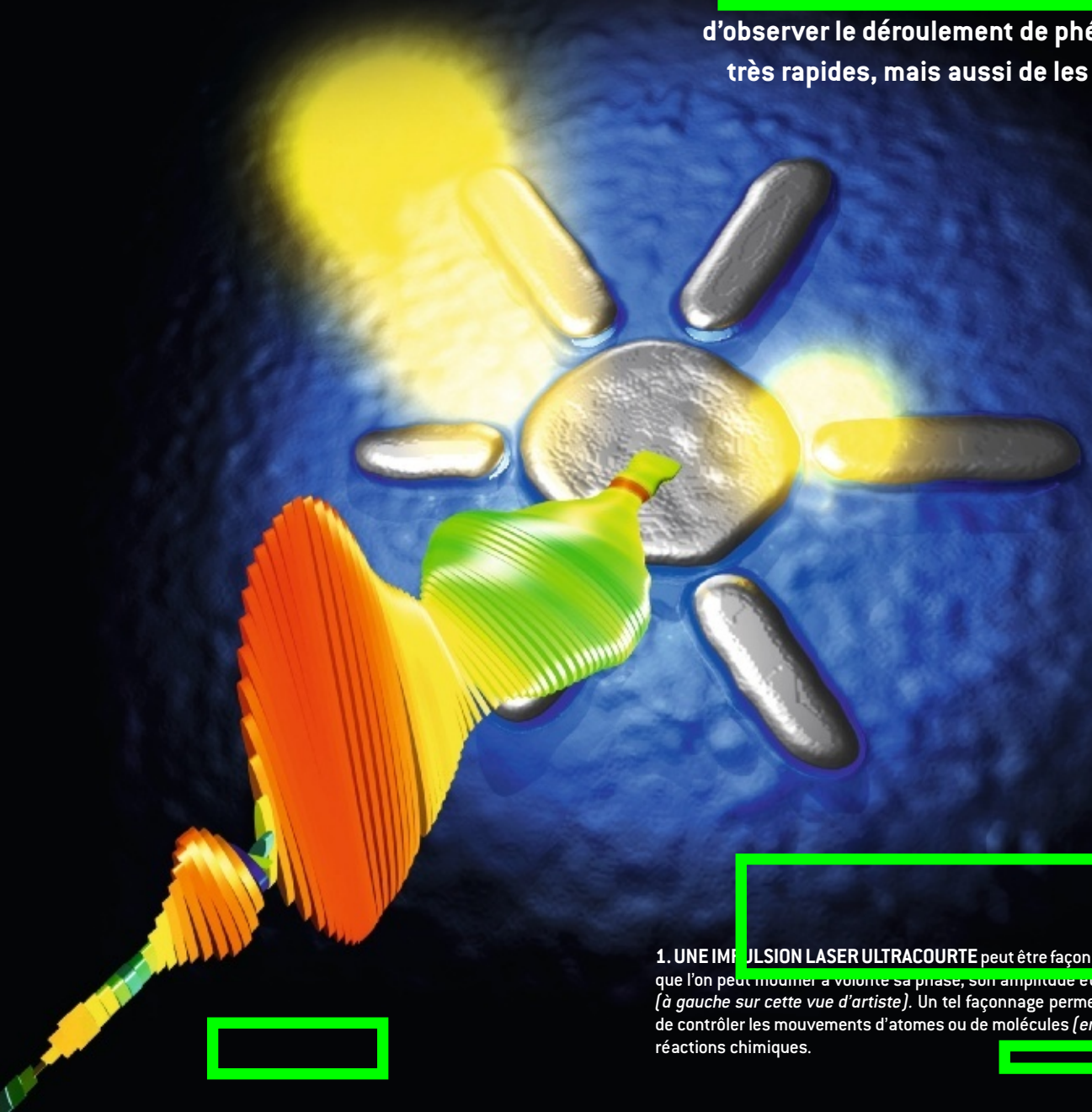
Avec Mickael Tanter et Jean-François Aubry, nous avons vérifié que la technique du retournement temporel permet de compenser avec précision les effets de la boîte crânienne. Avec un premier prototype de 300 transducteurs et un émetteur implanté dans le cerveau d'une brebis, nous avons montré que l'on pouvait concentrer sur des zones millimétriques des puissances acoustiques suffisantes pour élever la température des tissus à 65 °C. Puis pour éviter l'utilisation d'un émetteur implanté, nous avons développé une approche utilisant une source virtuelle. Elle consiste, après avoir obtenu l'image tridimensionnelle du crâne par scanner à rayons X, à bâtir un modèle informatique de la propagation ultrasonore à l'intérieur du crâne et à simuler l'opération de retournement temporel de signaux provenant de n'importe quel point du cerveau. La Société *Supersonic Image* a fabriqué un dispositif à 512 transducteurs, compatible avec un dispositif d'imagerie par IRM. La méthode a été validée sur des cadavres, et elle sera prochainement testée dans le cadre du projet *Ultrabrain*, à l'Institut du cerveau et de la moelle.

Enfin, un mot des sonars et radars à retournement temporel. Ils sont également en plein développement. Ils peuvent être utilisés en imagerie sous-marine des petits fonds où il est pratiquement impossible de repérer par les méthodes sonar classiques des cibles, telles des mines, à cause de la réverbération. De même, des radars à retournement temporel permettent d'observer des personnes se déplaçant derrière un mur. Les applications du retournement temporel dans les milieux complexes sont légion que ce soit pour les ondes acoustiques ou électromagnétiques. Qui plus est, les applications de ces techniques aux ondes lumineuses, aux ondes sismiques et même aux vagues à la surface de la mer sont plus que prometteuses.

# Façonner la lumière pour contrôler la matière

Béatrice Chatel

**Les physiciens savent aujourd'hui sculpter le profil des impulsions lumineuses ultrabrèves. Ce façonnage leur permet non seulement d'observer le déroulement de phénomènes très rapides, mais aussi de les contrôler.**



**1. UNE IMPULSION LASER ULTRACOURTE** peut être façonnée, c'est-à-dire que l'on peut moduler à volonté sa phase, son amplitude et sa polarisation *(à gauche sur cette vue d'artiste)*. Un tel façonnage permet d'observer ou de contrôler les mouvements d'atomes ou de molécules *(en gris)* dans des réactions chimiques.

Walter Pfeiffer



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

En 1878, à l'Université Stanford, en Californie, dans une carrière blanchie à la chaux, Charles Murvin s'élance sur son cheval Occident. Sur le bord de la piste, le photographe anglais Eadweard Muybridge aligne 12 appareils photographiques afin de fixer 12 images au millième de seconde, qui décomposent le mouvement du cheval au galop. Grâce à ce dispositif, il est pour la première fois possible de saisir un mouvement trop rapide pour l'œil.

Par la suite, l'homme observera des phénomènes de plus en plus brefs. Dans les années 1930, Harold Edgerton, de l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, développe la stroboscopie avec une lampe au xénon émettant des flashs de l'ordre de la microseconde. Cette technique permet de décomposer le mouvement et saisir des événements aussi brefs qu'une balle de pistolet traversant une pomme. Mais comment observer les mouvements d'atomes ou d'électrons dans une molécule ? Ces phénomènes se déroulent en quelques femtosecondes ou attosecondes (la femtoseconde équivaut à $10^{-15}$ seconde, soit un millionième de milliardième de seconde, et l'attoseconde correspond à $10^{-18}$ seconde). Pour ce faire, il faut disposer d'un outil capable de produire des stimulations de l'ordre de quelques femtosecondes.

Le développement du laser, à partir des années 1960, permet d'atteindre de telles résolutions. Le premier laser capable d'émettre une impulsion lumineuse d'une durée de 100 femtosecondes a été mis au point en 1981 dans les Laboratoires américains *Bell* par l'équipe de Charles Shank. Ce laser, dit à impulsion ultracourte ou femtoseconde, a ensuite été répliqué dans de nombreux laboratoires. Les chercheurs disposent depuis d'un outil pour étudier le déroulement de phénomènes ultracourts, telles les réactions chimiques.

En outre, les physiciens se sont aperçus qu'en manipulant les caractéristiques de ces impulsions ultrabrèves, ils étaient capables d'orienter les réactions chimiques. Il s'agit du façonnage des ondes ultracourtes. Cette technique repose sur des principes optiques et utilise des dispositifs que nous examinerons. Nous verrons ensuite comment le façonnage permet d'optimiser et de contrôler des réactions chimiques. Enfin, nous évoquerons quelques applications du façonnage des ondes laser dans l'étude des interactions lumière-matière.

Utilisés pour étudier le déroulement de phénomènes ultrabrefs, les lasers femtosecondes produisent des impulsions lumineuses dont les propriétés sont bien maîtrisées.

Toute impulsion lumineuse peut être considérée comme la somme d'un grand nombre d'ondes électromagnétiques sinusoïdales (ou « monochromatiques »), caractérisée chacune par une fréquence $\nu$ ou une période temporelle $T$ (on a $T = 1/\nu$), correspondant à une longueur d'onde $\lambda$ (telle que $\lambda = cT$, où $c$ est la vitesse de la lumière dans le vide). L'ensemble de ces composantes spectrales (ou fréquentielles) constitue le spectre de l'impulsion.

En effet, lorsque plusieurs ondes se superposent dans une région de l'espace, leurs amplitudes s'additionnent algébriquement en chaque point ; on dit qu'elles interfèrent. L'interférence est constructive si les ondes sont en phase, destructive si elles sont en opposition de phase.

Il existe une transformation mathématique qui permet de passer du domaine des fréquences au domaine temporel : la transformation de Fourier. Les physiciens des impulsions courtes l'utilisent pour décrire l'impulsion lumineuse soit en termes de spectre, soit en termes de durée. Ainsi, la largeur spectrale d'une impulsion définit sa durée. L'impulsion la plus courte est obtenue lorsque toutes les composantes spectrales sont en phase. On dit qu'elle est limitée par transformée de Fourier. En outre, plus une impulsion a une largeur spectrale importante, plus elle est brève. Une forme de façonnage (sur laquelle nous reviendrons) consiste à modifier la durée d'une impulsion à spectre fixé, en changeant les relations de phase dans le spectre.

Dans le vide, les différentes ondes monochromatiques qui constituent une impulsion lumineuse se déplacent à la même vitesse. La lumière parcourt ainsi 0,03 millimètre en 100 femtosecondes. En revanche, dans l'air ou un autre milieu matériel, la vitesse de propagation $v$ dépend de la fréquence : l'indice de réfraction, qui est égal au rapport des vitesses $c/v$, en dépend donc aussi.

## Plus une impulsion est brève, plus son spectre est large

Cette dépendance vis-à-vis de la fréquence (ou de la longueur d'onde) constitue le phénomène de dispersion, mis en évidence par la décomposition de la lumière blanche à travers un prisme. Ainsi, lorsqu'une impulsion se propage, elle s'allonge, car chacune de ses composantes a une vitesse différente : la partie rouge de l'impulsion (les basses fréquences) traverse le milieu plus vite que sa partie bleue (les hautes fréquences).

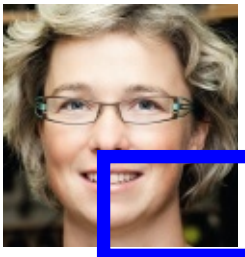
En outre, plus l'impulsion est brève, plus elle se déforme en se propageant. Ainsi, une impulsion laser de longueur d'onde centrale de 800 nanomètres et d'une durée de 10 femtosecondes, qui se propage dans un centimètre de verre, s'étire d'environ une picoseconde (1 000 femtosecondes). Une impulsion de 100 femtosecondes (dont le spectre est moins large) s'allonge beaucoup moins, puisqu'elle atteint environ 160 femtosecondes après propagation.

Pour compenser cet effet d'allongement et conserver les propriétés temporelles des impulsions après propagation, les physiciens ont développé des dispositifs dits compresseurs, à base de prismes ou de réseaux de diffraction. Ces montages optiques permettent d'allonger le chemin optique des composantes de basses fréquences

### L'ESSENTIEL

- Pour observer des mouvements très rapides de la matière, les physiciens utilisent des impulsions laser qui durent quelques femtosecondes.
- À l'aide de dispositifs optiques, on peut modifier la phase, l'amplitude ou la polarisation de ces impulsions : elles sont façonnées.
- De nombreux domaines de recherche se sont développés grâce au façonnage d'ondes laser, en chimie, biologie (microscopie multiphotonique) et physique des hautes intensités.

L'AUTEUR



Béatrice CHATEL est chercheuse du CNRS au Laboratoire Collisions, agrégats, réactivité, CNRS/Université Toulouse 3.

de l'impulsion, afin qu'elles arrivent en même temps que les composantes de hautes fréquences à l'endroit où l'on souhaite cibler l'impulsion pour réaliser une expérience. Cette méthode, utilisée pour tout laser femtoseconde, constitue le fondement du façonnage.

Les effets de propagation d'une impulsion ultracourte peuvent être plus complexes et nécessiter un ajustement différent des chemins associés à chaque fréquence. Dans ce cas, on utilise un façonneur programmable *(voir l'encadré page ci-contre)*. La technique la plus répandue repose sur un montage optique nommé ligne à dispersion nulle.

Dans ce montage, les composantes de l'impulsion sont spatialement séparées dans un plan, puis focalisées par une lentille sur les cellules indépendantes d'un dispositif à cristaux liquides programmable. Chaque cellule ou pixel de cristaux liquides joue le rôle d'un morceau de verre d'épaisseur ajustable en fonction de la tension électrique appliquée à ses bornes. Ainsi, chaque composante fréquentielle qui traverse un pixel suit un chemin optique plus ou moins allongé, selon un programme défini. On peut alors façonner à volonté la composition temporelle et fréquentielle de l'impulsion.

En choisissant les éléments optiques du montage, l'expérimentateur synthétise différentes sortes d'impulsions (train d'impulsions, impulsions de forme temporelle carrée, impulsions étirées, etc.). Ainsi, les physiciens façonnent des impulsions laser comme des compositeurs écrivent une partition en sélectionnant les différentes notes de la gamme (*do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, etc. qui équivalent aux fréquences) et en jouant donnant une durée choisie (blanche, noire, croche, silence, etc.). Par exemple, ils peuvent créer une impulsion débutant par du rouge, puis du orange, puis, après un silence, une seconde impulsion comportant la partie bleue du spectre.

À l'origine, le façonnage des impulsions ultracourtes avait pour objectif de compenser les déformations lors de la propagation. Les façonneurs programmables ont été mis au point ensuite pour engendrer de nouveaux effets lors de l'interaction avec la matière, comme nous le verrons plus loin.

En une décennie, les lasers femtosecondes se sont développés dans les laboratoires du monde entier. Ils ont trouvé des applications dans l'industrie, en médecine ou en recherche fondamentale. Les chercheurs les utilisent pour observer en direct les réactions chimiques, l'évolution ultrarapide de matériaux soumis à la lumière ou le transfert d'énergie dans des molécules *(voir la figure 1)*.

Ahmed Zewail, pionnier du domaine à l'Institut de technologie de Californie, a ainsi reçu le prix Nobel de chimie en 1999 pour ses études sur les états de transition des réactions chimiques par spectroscopie femtoseconde.

Il a développé la technique dite pompe-sonde, sorte de chronophotographie à la façon d'Edgerton où la résolution est donnée par la durée de l'impulsion laser. Une première impulsion laser, la « pompe », est envoyée sur un ensemble de molécules pour amorcer la réaction chimique. Une seconde impulsion, la « sonde », permet de sonder l'état des molécules à différents instants après le déclenchement du processus.

## La caméra des chimistes

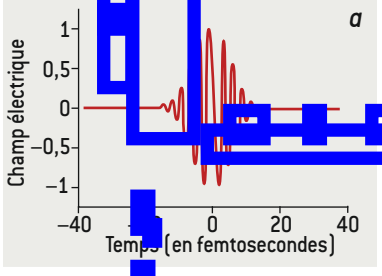
On retarde la sonde par rapport à la pompe en faisant varier la longueur du chemin optique de la sonde. Comme la vitesse de la lumière vaut environ 300 000 kilomètres par seconde, si la sonde parcourt 30 micromètres de plus, elle arrivera 100 femtosecondes plus tard. Si elle parcourt trois mètres de plus, elle arrivera dix nanosecondes plus tard, etc. En répétant ainsi l'expérience pour différents délais entre les impulsions pompe et sonde, on reconstruit pas à pas, comme un film, l'évolution en temps réel de la réaction chimique.

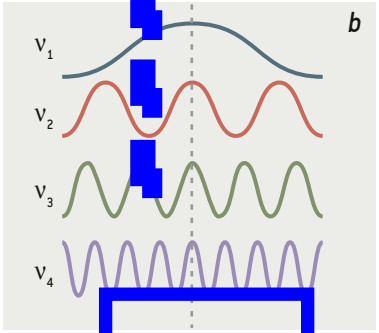
Par cette méthode, l'équipe d'A. Zewail a étudié la photo-isomérisation (conversion photochimique) du stilbène. Cette molécule est constituée de deux anneaux de benzène reliés sous une forme dite *cis* ou une forme dite *trans*. Les chimistes ont montré que les deux anneaux tournent de façon synchrone en passant d'une forme à l'autre.

D'autres travaux ont montré des mouvements similaires au sein de la molécule de rétinal, qui se situe à la base des cellules en bâtonnets de la rétine. La première étape de la perception de la lumière par l'œil est une conversion photochimique *cis-trans* du rétinal. Avec la technique pompe-sonde, les chimistes ont montré que cette réaction dure environ 200 femtosecondes, ce qui est bien plus

## Impulsion ultrabrève

✔ Une impulsion ultrabrève ou femtoseconde *(a)* est obtenue par la somme d'ondes monochromatiques qui ont une relation de phase *(b)*. On la caractérise dans le domaine des fréquences par son spectre. Par exemple, une impulsion laser de longueur d'onde centrée sur 800 nanomètres (dans le rouge) et de largeur spectrale 100 nanomètres, telle celle représentée *(a)*, a une durée égale à 10 femtosecondes.






© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

court que les processus de relaxation à l'échelle moléculaire qui transforment l'énergie lumineuse en chaleur. Cela a permis de comprendre pourquoi l'œil est aussi efficace et assure une bonne vision nocturne. De telles études ont aussi expliqué l'efficacité de la conversion d'énergie lumineuse de la chlorophylle lors de la photosynthèse.

La femtochimie s'intéresse à la dynamique des réactions chimiques sur des échelles de temps ultracourtes. En parallèle, un domaine complémentaire a émergé : celui du contrôle. En effet, les chercheurs se sont aperçus que l'on peut également contrôler le déroulement de réactions chimiques en modifiant les paramètres du laser (amplitude, phase et polarisation).

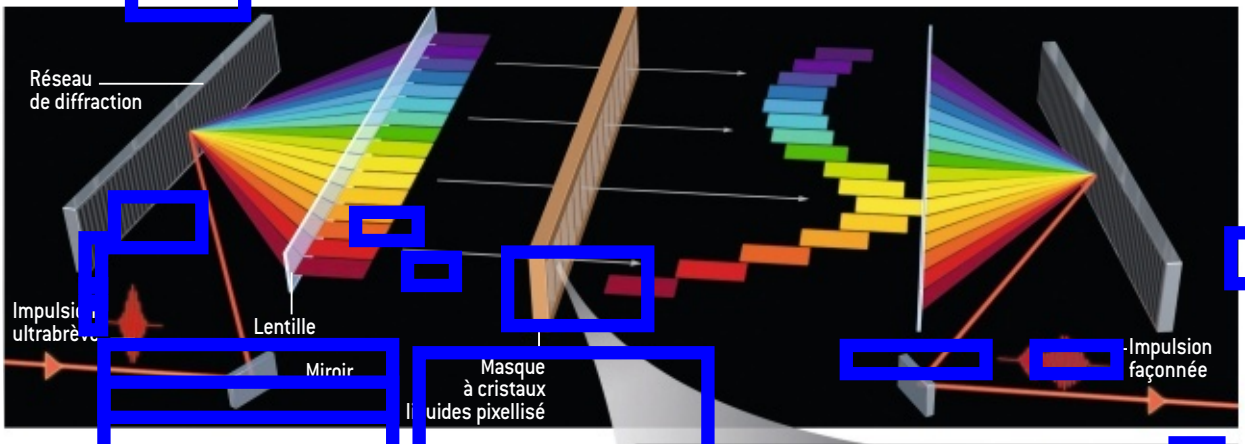
## Quand le façonnage rejoint la théorie quantique

Un tel contrôle, dit cohérent, est fondé sur le concept des interférences quantiques et sur la connaissance théorique des systèmes moléculaires. Ainsi, une réaction chimique peut suivre différents « chemins », plus ou moins coûteux en énergie : des chemins directs ou des chemins indirects, dits séquentiels. Ces chemins sont engendrés par l'interaction des différentes composantes spectrales avec la matière. Ils ont une relation de phase entre eux qui dépend de la relation de phase entre les composantes spectrales de l'impulsion.

Le façonnage de l'impulsion permet de créer des interférences constructives entre des chemins et de maximiser par exemple le produit de la réaction chimique. Pour améliorer la compréhension de l'interaction des impulsions façonnées, de nombreux travaux ont été menés sur des systèmes modèles.

Notre équipe à Toulouse s'est ainsi intéressée à l'atome de sodium. Cet atome

### LE FAÇONNAGE D'IMPULSIONS ULTRACOURTES




Bruno Bourgeois

Une impulsion lumineuse ultracourte est décrite par une fonction du temps et par un vecteur déterminant la direction du champ électromagnétique. Cette impulsion est tellement courte qu'on ne sait pas la façonner dans le temps. On la façonne alors dans l'espace des fréquences relié au domaine temporel par la transformée de Fourier. Dans l'espace des fréquences, une impulsion est définie par une phase, une amplitude et une polarisation. Le façonnage est réalisé grâce à un dispositif placé dans un dispositif nommé ligne à dispersion nulle *(ci-dessus)*.

L'impulsion initiale est d'abord envoyée sur un premier réseau de diffraction où les fréquences constitutives sont séparées. Elles sont ensuite focalisées dans un plan où l'on dispose un masque. Un montage symétrique permet de recomposer toutes les composantes spectrales en sortie. Le masque comprend, entre deux couches de verre, une couche d'éléments à cristaux liquides. Ceux-ci sont répartis en bandes horizontales, cellules individuelles, mis sous tension par des électrodes reliées à un programmateur.

Les cristaux liquides disposés dans le masque sont de type nématique. Leurs molécules ont une forme de bâtonnets, orientés parallèlement aux couches de verre en l'absence de tension. Lorsqu'on applique un potentiel $U$ entre deux électrodes d'un pixel, les molécules pivotent suivant la direction du champ électrique. Cela modifie l'interaction des molécules avec la lumière, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'indice de réfraction du milieu, ou, de façon équivalente, d'allonger le chemin optique de l'onde qui le traverse *(voir le zoom)*.

En contrôlant ainsi le chemin optique suivi par chaque composante fréquentielle, on réalise un façonnage de la phase de l'impulsion. Il existe deux autres types de façonnage, en amplitude ou en polarisation, qui utilisent des éléments supplémentaires dans ce montage. Pour façonner une onde en amplitude, on ajoute pour atténuer chaque onde un masque de densité, obtenu en utilisant les mêmes cristaux liquides avec des polariseurs disposés de part et d'autre du masque. Pour façonner une impulsion en polarisation, on modifie la direction du champ électromagnétique en orientant les cristaux liquides suivant l'axe souhaité.

Le type de façonnage est choisi en fonction des paramètres que l'on désire contrôler dans une expérience. Certains laboratoires sont équipés de doubles façonneurs, pour lesquels phase et amplitude, ou phase et polarisation, sont façonnées en même temps. Il existe également des triples façonneurs (de phase, amplitude et polarisation).

## SUR LE WEB

Réseau FEMTO :
http://reseau-femto.cnrs.fr/spip.php?rubrique39

## BIBLIOGRAPHIE


A. Monmayrant *et al.* **A newcomer's guide to ultrashort pulse shaping and characterization**, *J. Phys. B*, vol. 43, 103001, 2010.

S. Haessler *et al.* **Attosecond imaging of molecular electronic wavepackets**, *Nature Physics*, vol. 6, pp. 200-206, 2010.

G. Labroille *et al.* **Dispersion-based pulse shaping for multiplexed two-photon fluorescence microscopy**, *Optics Letters*, vol. 35, pp. 3444-3446, 2010.

B. Chatel *et al.* **Competition between sequential and direct paths in a two-photon transition**, *Physical Review*, A 68, 041402, 2003.


a la propriété d'émettre des raies de fluorescence intenses. Présent dans la mésosphère (couche de l'atmosphère comprise entre 50 et 80 kilomètres d'altitude), le sodium est d'ailleurs utilisé comme étoile artificielle afin de corriger les distorsions des turbulences atmosphériques sur les images des télescopes. Le principe est d'envoyer une impulsion laser dans le ciel pour exciter un ensemble d'atomes de sodium. Ils émettent alors de la lumière à un endroit de l'espace, créant une étoile artificielle.

Pour améliorer le degré de correction, nous excitons les atomes de sodium par un mécanisme où ils absorbent deux photons. Nous avons étudié en quoi le contrôle cohérent permettrait de maximiser cette excitation à deux photons afin de rendre l'étoile plus brillante. C'est là qu'intervient le contrôle par façonnage de l'impulsion. En effet, pour exciter une transition à deux photons vers un état donné, l'atome peut absorber un premier photon jaune de façon à rejoindre un état quantique intermédiaire, et arriver à l'état final souhaité en absorbant un second photon vert.

Ce chemin est le chemin séquentiel, par opposition au chemin direct, suivant lequel l'atome absorbe d'un coup une paire de photons (telle que la somme de leurs énergies soit égale à l'énergie des deux photons, jaune et vert). Si toutes les fréquences présentes dans l'impulsion laser arrivent en même temps, toutes les paires appropriées de photons contribuent au chemin direct. Si, en revanche, on façonne l'impulsion de telle sorte qu'un photon jaune arrive en premier, et un photon vert en second, on favorise le chemin séquentiel. En choisissant finement le façonnage des impulsions, les physiciens font interférer les chemins quantiques direct et séquentiel. Quand l'interférence est constructive, l'excitation des atomes est à son maximum.

## Sculpter la matière

En 1998, le théoricien Herschel Rabitz, de l'Université de Princeton, aux États-Unis, a introduit le concept d'optimisation du façonnage. Selon lui, il n'est plus nécessaire de savoir modéliser le système moléculaire et l'interaction pour guider la réaction dans le sens souhaité. Lors d'une interaction entre les molécules et l'impulsion laser, il suffit de définir le signal à optimiser (les produits de la réaction chimique par exemple) et de se donner le moyen de le mesurer. Pour ce faire, on utilise un algorithme d'évolution, en appliquant une boucle rétroactive entre ce signal et le façonnage de l'impulsion.

L'équipe de Gustav Gerber, à l'Université de Würzburg, en Allemagne, a apporté la première démonstration expérimentale de ce concept en 1998. Elle a montré que lors de la photodissociation d'un complexe fer-carbonyl, engendrée par une impulsion laser façonnée, il est possible de modifier le rapport des concentrations des deux produits de la dissociation (de 2:1 à 5:1). Le façonnage de l'impulsion, réalisé en quelque sorte par tâtonnements automatiques, optimise le signal de façon à guider le système vers l'état désiré.

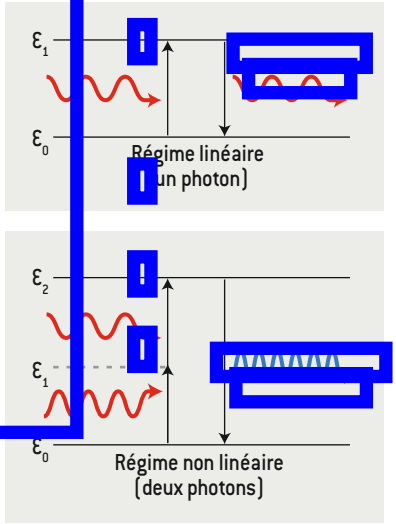
Outre la femtochimie, les impulsions laser ultrabrèves sont utilisées dans des techniques qui exploitent leur concentration d'énergie. En effet, un laser à impulsions ultracourtes atteint des puissances instantanées (rapport de l'énergie par impulsion sur la durée de l'impulsion) de l'ordre du gigawatt et une densité de puissance (rapport de la puis-

### RÉPONSE NON LINÉAIRE D'UN MILIEU

Lorsqu'on [illegible] de transmission, de diffusion, ou d'absorption et de réémission de la lumière traduisent la réponse linéaire du milieu éclairé.

Regardez-vous dans la glace dans une pièce sombre, vous devinez seulement votre visage. En allumant la lumière, vous multipliez l'intensité lumineuse par 50 fois plus lumineux. La réflexion de la lumière est une réponse linéaire, car le signal détecté est proportionnel au signal d'entrée.

À fort éclairement, la réponse du milieu peut devenir non linéaire. Les lasers femtosecondes, avec lesquels on peut concentrer de fortes énergies en un temps bref, peuvent engendrer une réponse non linéaire des matériaux. Lorsque l'on dirige un faisceau lumineux sur un système moléculaire, les électrons des atomes de la matière oscillent et passent d'un niveau d'énergie initial ($\varepsilon_0$) à un niveau d'énergie supérieur ($\varepsilon_1$ ou $\varepsilon_2$). Ceux-ci réémettent de l'énergie sous forme d'un photon en revenant à leur niveau d'énergie initial. Si le champ est très intense, l'oscillation des électrons est déformée [illegible] pas la même fréquence que la lumière incidente. En termes corpusculaires, cela se traduit par le fait que la matière absorbe par [illegible] photons rouges et émet un photon bleu de fréquence égale à deux fois celle d'un photon rouge). Tel est le principe de l'absorption à deux photons utilisée dans la microscopie à deux photons. Avec une lumière aussi intense, il est possible d'engendrer des phénomènes non linéaires d'ordre élevé, avec des harmoniques supérieures (absorption de *n* photons).






© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

sance instantanée sur la section du faisceau) de l'ordre du térawatt ($10^{12}$ watts) par centimètre carré.

En imagerie biologique avec des intensités plus faibles, cette concentration d'énergie peut servir à reconstruire une image en volume d'un tissu épais (constitué de plusieurs couches de cellules, tels les os ou les muscles) et à en distinguer les différents constituants.

La technique de microscopie multiphotonique, développée dans les années 1980, utilise des lasers femtosecondes. Elle est fondée sur le phénomène d'absorption à deux photons, qui repose sur la réponse non linéaire des tissus biologiques *(voir l'encadré page ci-contre)*. Les impulsions laser sont focalisées dans un petit volume. La résolution en profondeur est obtenue en apportant une énergie importante, qui entraîne une réponse non linéaire (émission d'une lumière de fréquence différente) du volume de tissu observé. Il ne reste plus alors qu'à balayer ce point focal pour reconstruire l'image de l'objet.

Depuis peu, les biologistes combinent le façonnage d'impulsions à la technique de microscopie multiphotonique. En effet, le façonnage maximise la réponse non linéaire d'un type de molécule plutôt qu'un autre, ce qui accroît la sélectivité et la spécificité des signaux observés, et rend les images plus riches en informations. Ainsi, Manuel Joffre et Emmanuel Beaurepaire, du Laboratoire Optique et biosciences à Palaiseau, ont visualisé simultanément deux protéines différentes dans un embryon de mouche, à l'aide d'impulsions laser façonnées *(voir la figure 2)*. En superposant les deux images obtenues, ils ont reconstruit une image unique contenant les deux marquages différenciés.

## Naissance de l'attophysique

Si la microscopie multiphotonique s'appuie sur des effets non linéaires d'ordre 2 ou 3, les lasers femtosecondes ont aussi permis d'atteindre le régime des harmoniques élevées, d'ordre *n*. Suivant l'approche corpusculaire de la lumière, un milieu absorbant *n* photons à la fréquence *ν* émet de la lumière à la fréquence *nν*.

Ainsi, en 1988, Anne L'Huillier et ses collègues, au CEA de Saclay, ont excité des atomes de gaz inertes tels que le néon et l'argon à l'aide d'impulsions femtosecondes. Ils ont observé l'émission de lumière à des fréquences dites harmoniques, multiples de la fréquence laser initiale.

L'utilisation du façonnage a participé au contrôle de l'émission des harmoniques. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables d'engendrer un grand nombre d'harmoniques en même temps, ce qui crée une impulsion laser avec un spectre extrêmement large. Cela a permis d'envisager l'obtention d'impulsions attosecondes.

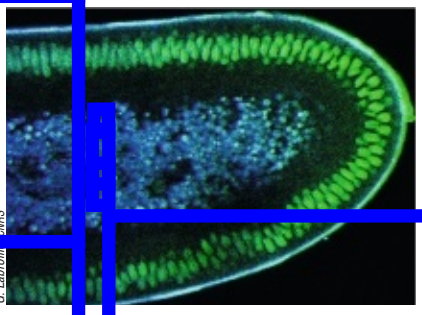
Une décennie de travaux a été nécessaire pour contrôler ces processus et mettre au point des dispositifs permettant de mesurer la durée d'impulsions aussi courtes. Aujourd'hui, des impulsions qui durent moins d'une centaine d'attosecondes ont par exemple permis de suivre en temps réel l'évolution d'un électron dans un atome ou une molécule.

En une trentaine d'années, les lasers femtosecondes ont conquis de nombreux laboratoires, permettant à la fois d'observer des phénomènes de plus en plus brefs et d'atteindre des densités de puissance élevées.

Le façonnage des impulsions laser, maintenant bien maîtrisé, permet de produire des impulsions très brèves et très intenses, de contrôler des réactions chimiques, d'observer des effets fondamentaux de l'interaction lumière-matière fondés sur des interférences quantiques, mais aussi d'améliorer grandement la sélectivité et la spécificité de l'imagerie biologique. Enfin, l'association du contrôle des impulsions courtes et des processus hautement non linéaires a donné naissance à l'« attophysique », la science des impulsions attosecondes.

D'autres applications se développent dans le domaine du codage de l'information. Des séquences d'impulsions façonnées ont été utilisées pour « imprimer » une information sur des atomes. En parallèle du façonnage dans le domaine fréquentiel, de nombreux travaux ont été faits dans le domaine spatial.

Combiné avec le contrôle spatial des impulsions, il permet de focaliser des impulsions dans des milieux très diffusants *(voir l'article Voir à travers le brouillard dans ce numéro)*, ou d'atteindre des puissances laser inégalées. Enfin, avec le développement de la nanoplasmonique et des techniques d'imagerie électronique, il ouvre la voie au contrôle de la matière à l'échelle nanométrique. Le façonnage d'impulsions a encore un bel avenir. ■



G. Labroille/CNRS

**2. EMBRYON DE DROSOPHILE** en cours de développement observé en microscopie biphotonique avec des impulsions façonnées. L'embryon est marqué avec la protéine GFP *(Green Fluorescent Protein)* qui repère les noyaux cellulaires, mais présente aussi une fluorescence naturelle bleue dans les réserves vitellines internes. Des impulsions façonnées de façon à exciter sélectivement par absorption à deux photons soit les fluorophores bleus, soit les fluorophores verts, sont dirigées vers l'embryon. Deux images, enregistrées simultanément avec les deux formes d'impulsions, puis combinées, révèlent la distribution de la fluorescence naturelle des réserves vitellines en bleu et de celle de la GFP dans les noyaux en vert.

# Voir à travers le brouillard

Sylvain Gigan

**La lumière étant diffusée par le brouillard, l'œil ne peut distinguer les objets qui y sont plongés. Mais en étudiant la propagation des ondes lumineuses dans les milieux diffusants, les scientifiques commencent à voir au-delà…**

© Shutterstock/LobsteR

Quand le brouillard se forme, les objets échappent peu à peu au regard et sont d'autant plus noyés dans une blancheur ambiante qu'ils y sont enfouis. La diffusion de la lumière est responsable de ce phénomène.

Le brouillard est une suspension de gouttelettes d'eau dans l'air. Ces gouttelettes dévient la lumière : on dit qu'elles la diffusent. La lumière venant des objets proches a peu de chances de rencontrer une gouttelette sur son trajet, de sorte que l'on peut voir distinctement ces objets. Cette partie de la lumière qui n'est pas déviée, même dans un milieu très « diffusant », est la lumière balistique. Pour les objets éloignés, la probabilité que la lumière ne soit pas déviée diminue jusqu'à devenir quasi nulle ; la lumière est alors diffusée de nombreuses fois, formant une lueur blanche *(voir la figure 1)*. L'œil ou n'importe quel appareil d'imagerie classique, tel un appareil photographique, sont incapables de voir l'objet ou de localiser la source de lumière.

## La diffusion de la lumière est omniprésente

La diffusion de la lumière est omniprésente dans la nature ; le brouillard, mais aussi la neige, le papier, le lait ou une couche de peinture blanche sont des exemples de milieux diffusants. Ces matériaux sont blancs, car ils dévient la lumière, mais ne l'absorbent pas.

Les tissus biologiques, par exemple la peau, sont aussi diffusants, car ils ont une structure hétérogène à toutes les échelles. Chacun peut s'en rendre compte en plaçant une lampe de poche derrière ses doigts : la lumière n'est pas complètement bloquée et une mince couche de tissu laisse passer une lueur. C'est de la lumière diffusée. Cette lumière est de couleur rouge, car le sang absorbe les longueurs d'onde proches du bleu, laissant passer les composantes rouges de la lumière. Les tissus biologiques représentent un défi pour l'imagerie et fascinent les scientifiques ; ces derniers mettent tout en œuvre pour « voir » à travers et au sein de ces milieux très diffusants.

Si la compréhension des mécanismes de diffusion est récente, les peintres traduisent le phénomène intuitivement depuis longtemps, à l'instar de Léonard de Vinci dans ses paysages embrumés, de Rubens dans son rendu des teintes de chair ou encore de Georges de La Tour dans sa façon de représenter la bougie à travers une main d'enfant. Non seulement ils reproduisent parfaitement les effets de diffusion de la lumière, mais ils les mettent aussi à profit jouant sur l'épaisseur et l'empilement des couches de peinture pour moduler cette diffusion et obtenir l'effet artistique voulu.

Cependant, la diffusion de la lumière rend l'imagerie classique, avec un microscope optique par exemple, inutilisable. Certaines techniques sélectionnent la partie balistique de la lumière et récupèrent ainsi des images en profondeur. C'est le cas des méthodes de microscopie confocale et non linéaires, ou de tomographie par cohérence optique. Mais la part de lumière balistique diminue de façon exponentielle lorsqu'on s'enfonce dans le milieu : on ne détecte rapidement que de la lumière qui a été diffusée de nombreuses fois et ces techniques sont limitées aux faibles profondeurs.

Les milieux diffusants en volume sont dits opaques (mais non absorbants) ou translucides. Ils laissent passer la lumière, mais pas les images. Nous allons voir qu'aujourd'hui deux techniques permettent aux scientifiques de focaliser la lumière à travers ces milieux opaques. Elles ouvrent de nouvelles perspectives pour la recherche et l'imagerie des tissus biologiques.

Le calcul exact de la propagation de la lumière dans un milieu opaque est impossible en pratique : il nécessiterait de connaître parfaitement la taille et la position de diffuseurs (par exemple, la forme et la position de toutes les gouttelettes d'eau composant le brouillard). De même, on ne peut pas connaître exactement la position et la vitesse de chaque molécule d'un gaz. Toutefois, dans les gaz, la thermodynamique nous permet d'extraire des grandeurs pertinentes telles que la température et la pression. En optique, on peut également comprendre macroscopiquement le transport de la lumière dans les milieux opaques. Ce phénomène de transport, qui a le même comportement et les mêmes équations que le transport de la chaleur, nous permet de prédire un certain nombre de paramètres, telle la transmission globale de lumière, mais l'information sur le comportement microscopique est perdue.

Néanmoins, la lumière, même multidiffusée, reste utilisable en imagerie pour deux raisons que nous allons détailler : elle se propage de façon déterministe et peut être « temporellement » retournée. Le contrôle de la lumière est lié au fait qu'il

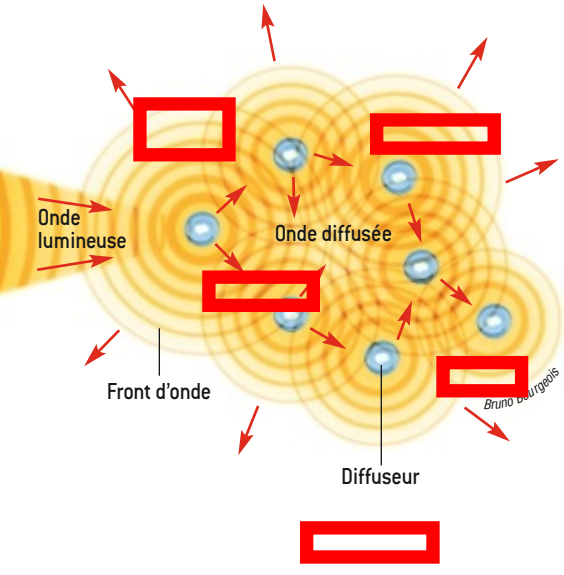
### L'ESSENTIEL

- La lumière est déviée de multiples fois à travers un milieu opaque. On ne peut donc pas voir l'objet l'ayant émise ou transmise.
- La propagation de la lumière diffusée est déterministe et peut être inversée temporellement.
- Les miroirs à conjugaison de phase renvoient une onde lumineuse à l'identique, mais renversée dans le temps ; ils permettent de reconstruire l'image d'un objet après diffusion.
- Avec les techniques de contrôle actif du front d'onde, les scientifiques réussissent à focaliser la lumière diffusée et espèrent ainsi voir à travers un tissu biologique, et même à l'intérieur de ce dernier.

**DANS LE BROUILLARD,** la lumière envoyée par la tour Eiffel est diffusée par les gouttelettes d'eau en suspension. Dans la partie haute de la tour, on ne voit qu'une lueur blanche, car toute la lumière a été diffusée de très nombreuses fois. À proximité de la base de l'édifice, une partie de la lumière, dite balistique, est peu déviée, car elle traverse une épaisseur de brouillard moindre : les pieds du monument sont donc visibles.

## La diffusion de la lumière

✔ **Une onde lumineuse monochromatique, dont l'énergie est portée par les photons, présente une période spatiale déterminée, la longueur d'onde λ, la distance séparant deux maximums successifs de l'onde. Quand une source émet de la lumière, la surface où tous les points de l'onde ont la même phase est le front d'onde, la « ligne de crête » de l'onde. Une onde lumineuse qui rencontre un obstacle, un « diffuseur » tel qu'une goutte d'eau, se voit réémise dans toutes les directions. Cette onde secondaire se propage jusqu'à rencontrer un autre diffuseur, et ainsi de suite. C'est la diffusion multiple.**




L'AUTEUR

Sylvain GIGAN est maître de conférences à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech) et effectue ses recherches au Laboratoire d'optique de l'Institut Langevin *Ondes et images*.

s'agit d'une onde électromagnétique portée par des photons et présentant une double périodicité, temporelle (la période T) et spatiale (la longueur d'onde λ).

La propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu opaque non absorbant, aussi complexe soit-elle, n'est pas aléatoire, mais déterministe : un même faisceau (une onde de lumière monochromatique, de longueur d'onde unique) envoyé sur le même milieu donne exactement la même figure de diffusion, jusqu'aux détails microscopiques des interférences. Ensuite, les équations de propagation d'une onde dans un milieu diffusant (en l'absence d'absorption) ne changent pas par renversement du temps (changement de $t$ en $-t$ dans les équations). On ne sait pas renverser le sens du temps, mais on dispose d'outils pour réémettre une onde « à l'envers ». La lumière revient alors sur ses pas, et comme la propagation est déterministe, le processus de diffusion est inversé. Ce sont ces concepts qui permettent de guider la lumière à travers les milieux opaques. Voyons donc comment retourner une onde et illustrons ces idées par quelques exemples.

En acoustique, en micro-ondes ou en hyperfréquence, on dispose de sources et de capteurs émettant et détectant un signal temporel quelconque ; c'est dans ces domaines que les concepts de renversement du temps et de contrôle de la propagation dans les milieux complexes ont d'abord été démontrés *(voir l'article* La complexité : un atout pour le retournement temporel des ondes *dans ce numéro)*. En optique, les fréquences des ondes électromagnétiques (de l'ordre de $10^{15}$ hertz, soit un million de gigahertz) sont bien supérieures aux vitesses des détecteurs, même les plus rapides : la mesure directe du champ électromagnétique est impossible et l'on n'a accès qu'à l'intensité lumineuse moyenne.

Par ailleurs, les sources lumineuses – les lasers – ne sont pas modulables aisément ; on ne peut pas, comme en acoustique, choisir le signal à envoyer. En revanche, l'optique permet, dans le visible, d'observer les détails de la matière à l'échelle de la centaine de nanomètres de résolution *(voir l'article* Lumière sur l'infiniment petit *dans ce numéro)*. Deux outils ont récemment permis d'étendre à l'optique les concepts de renversement du temps et d'imagerie en milieu diffusant développés en acoustique : les miroirs à conjugaison de phase et le contrôle de front d'onde.

Les miroirs à conjugaison de phase sont des dispositifs qui ne réfléchissent pas seulement une onde, comme le fait un miroir classique, mais la renvoient en changeant le signe de sa phase. Pour une onde monochromatique, ce changement correspond à un renversement temporel. Une onde divergente se réfléchissant sur un tel miroir devient convergente et « reconverge » sur sa source. En optique géométrique (l'approximation de l'optique qui s'appuie sur la notion de rayon lumineux, objet théorique représentant la direction de propagation de l'énergie d'une onde), un rayon lumineux incident sur un miroir à conjugaison de phase revient sur lui-même quel que soit son angle d'incidence *(voir l'encadré page ci-contre)*.

## Retour direct à l'envoyeur

Pour l'optique, c'est Juris Upatnieks, de l'Université du Michigan, qui a montré ce principe de conjugaison de phase en 1966 ; il a réussi à reformer une image à travers une surface de verre rugueuse par conjugaison de phase, grâce à un hologramme enregistré sur une plaque photographique (nous y reviendrons ci-après). Mais aucun dispositif passif, ni aucune géométrie simple de surface ne réalisent un tel effet.

En 1976, Amnon Yariv, à l'Institut californien de technologie, proposa le premier miroir à conjugaison de phase fondé sur un effet non linéaire, dit « à mélange de trois ondes ». Il montra comment un cristal illuminé par un laser peut, dans certaines conditions, se comporter comme un miroir à conjugaison de phase. Il lança ainsi l'utilisation de ces miroirs avec les lasers pour corriger les aberrations (le fait que les ondes issues d'une même source lumineuse ponctuelle ne convergent pas toutes en un même point après avoir traversé un milieu) et pour améliorer la qualité des images.

Cependant, l'application de ces miroirs aux milieux diffusants biologiques n'est intervenue que récemment. En 2008, l'équipe de Changhuei Yang, à l'Institut californien de technologie, a montré qu'un miroir à conjugaison de phase peut reformer une image à travers un milieu biologique, du blanc de poulet de moins d'un millimètre d'épaisseur. Elle a utilisé un processus de conjugaison de phase fondé sur des cristaux non linéaires particuliers, dits photoréfractifs.

Dans la première étape de cette expérience, un faisceau de lumière laser est



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

envoyé à travers le milieu diffusant. La lumière diffusée transmise illumine le cristal, où elle se superpose avec un autre faisceau issu du même laser. Le cristal, comme une plaque photographique, enregistre le champ lumineux résultant des interférences, c'est-à-dire un hologramme. Dans une deuxième étape, les scientifiques « relisent » cet hologramme à l'aide d'un laser et renvoient vers le milieu le champ conjugué en phase ; ce dernier repasse alors de façon contrôlée à travers le milieu et se focalise, pour être « vu ». Ainsi, une image est reformée après avoir effectué un aller-retour à travers un tissu biologique.

Cette première expérience exploite le déterminisme et la stabilité par renversement du temps du phénomène de diffusion, et la faculté qu'a un miroir à conjugaison de phase de retourner une onde. Mais ces miroirs ne sont pas la panacée : ils ne peuvent réaliser qu'une seule tâche, le retournement temporel du champ, et sont peu flexibles, en particulier pour l'imagerie où l'on veut parfois aller au-delà du retournement temporel dans le contrôle de l'onde.

Or, parallèlement à cette approche de conjugaison de phase, l'équipe d'Allard Mosk, à l'Université de Twente aux Pays-Bas, conçevait une autre méthode : le contrôle actif des ondes grâce aux modulateurs spatiaux (de phase). Ces dispositifs associent le retournement temporel avec le contrôle du front d'onde, un front d'onde étant une surface formée de points où la phase de l'onde a la même valeur.

Aujourd'hui, ce matériel permet aux scientifiques de manipuler efficacement la lumière. Une onde plane (dont le front d'onde est plan) se réfléchissant sur un miroir plan reste une onde plane. Un modulateur spatial se comporte comme une matrice de un million de petits miroirs environ (des pixels, issus des technologies à cristaux liquides), dont on peut changer par ordinateur la réflectivité ou la position. Il permet ainsi de

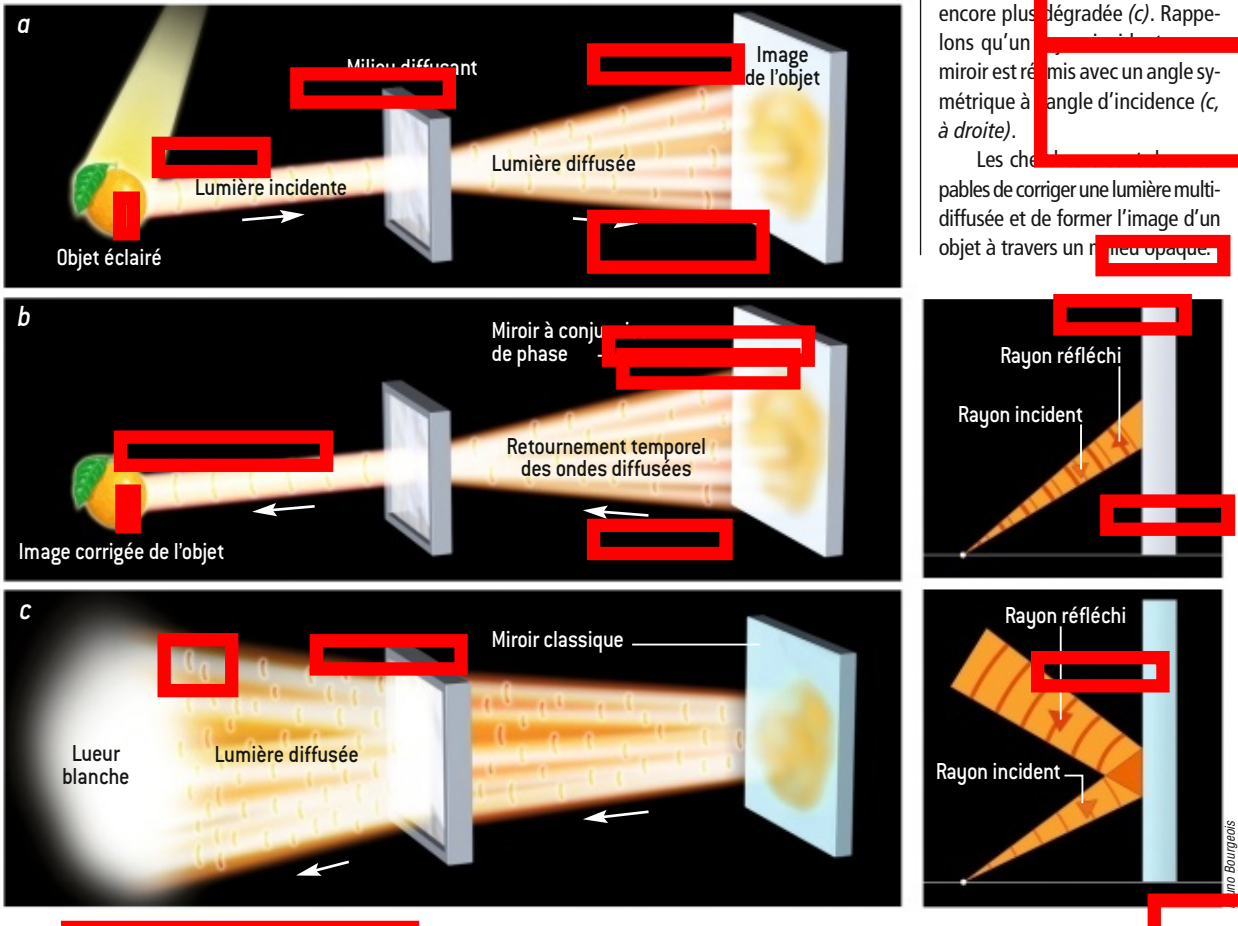
## LE RETOURNEMENT TEMPOREL DE LA LUMIÈRE DIFFUSÉE

Quand on regarde un objet, par exemple une orange, à travers un milieu diffusant, tel un tissu biologique (qui absorbe presque pas dans le rouge et l'infrarouge), on ne voit plus rien (*a, l'image est projetée sur un écran*). Les scientifiques tentent de voir à travers ces milieux opaques en se fondant sur deux grands principes de la propagation de la lumière : dans ces milieux est déterministe et prévisible, et elle peut être

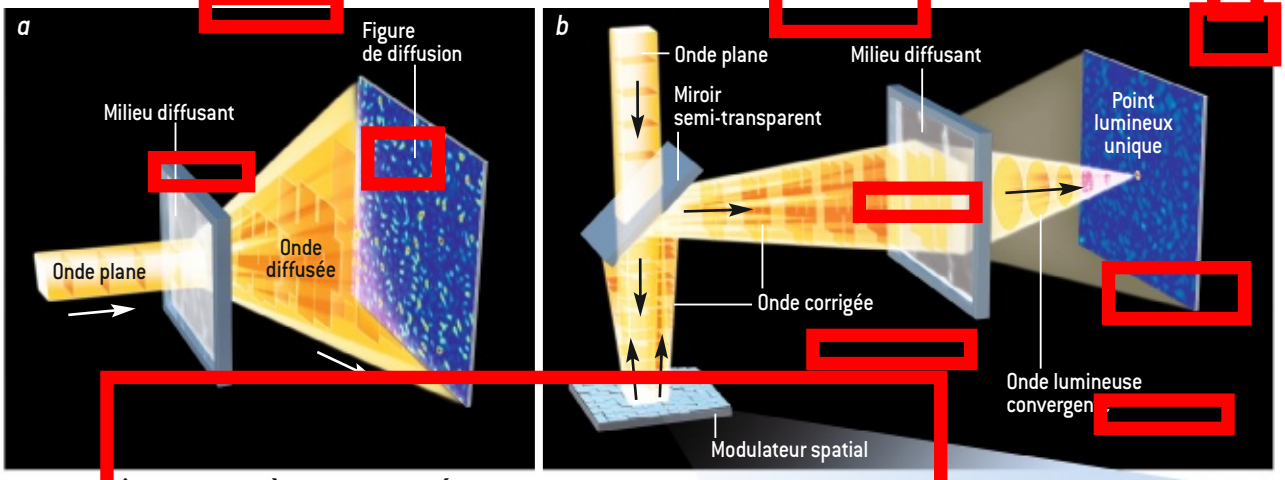
Pour ce faire, on peut utiliser un miroir à conjugaison de phase, qui réfléchit une onde lumineuse en changeant le signe de sa phase (*b*). Un rayon incident sur ce miroir revient sur lui-même, comme si on inversait le temps pour la lumière (*b, à droite*). En plaçant ce miroir après le milieu diffusant, on peut renvoyer la lumière multidiffusée de l'image transmise et reformer une image de l'objet. Le retournement temporel des ondes lumineuses diffusées, en « annulant » la diffusion multiple de l'aller.

Un miroir classique réfléchirait les ondes sans les inverser, de sorte qu'elles seraient à nouveau diffusées de multiples fois en traversant le milieu diffusant : l'image serait encore plus dégradée (*c*). Rappelons qu'un rayon incident sur un miroir est réfléchi avec un angle symétrique à l'angle d'incidence (*c, à droite*).

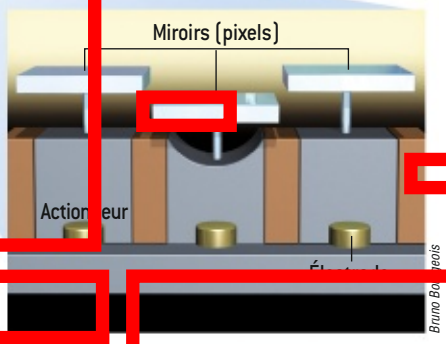
Les chercheurs sont capables de corriger une lumière multidiffusée et de former l'image d'un objet à travers un milieu opaque.




Jérôme Bourgeois




**2. LE CONTRÔLE D'UNE LUMIÈRE MULTIDIFFUSÉE** peut se faire selon le principe imaginé par A. Mosk et ses collègues, en réalisant une conjugaison de phase « à l'envers ». Ils ont envoyé une onde plane sur un milieu très diffusant et ont obtenu une figure de diffusion qui présente des grains brillants et sombres dus aux interférences *(a)*. Puis ils ont utilisé un modulateur de phase pour optimiser et corriger l'onde incidente afin d'obtenir, de l'autre côté du milieu diffusant, un point focalisé très brillant. Le modulateur spatial contient environ un million de petits miroirs (les pixels), contrôlés par ordinateur, qui modifient à volonté la phase de l'onde. Il façonne ainsi la phase et le front d'onde (sa forme) d'une onde qui se réfléchit sur lui *(voir le cartouche)*. Ainsi, en optimisant chaque pixel pour trouver le front d'onde incident idéal qui focaliserait en un point unique après sa traversée du milieu, les scientifiques ont pu compenser la diffusion. Ondes corrigées par le modulateur de phase traverse alors le milieu diffusant et donne une interférence constructive en un point unique, produisant un point jusqu'à 1 000 fois plus brillant que les autres *(b)*.




Bruno Bouvet-Bois

façonner la composante spatiale – la phase – d'une onde.

Les miroirs déformables, utilisés en astronomie pour corriger les aberrations introduites par l'atmosphère, font de même, mais ce sont des dispositifs encombrants ayant un nombre limité de pixels (une centaine pour les plus performants). Les modulateurs spatiaux, quant à eux, peuvent avoir des millions de pixels, ce qui est crucial pour un phénomène aussi complexe que la diffusion multiple.

## Un dogme tombe : on contrôle la lumière diffusée

A. Mosk se posa la question suivante : ne pourrait-on pas faire l'équivalent de la conjugaison de phase, mais à l'envers, c'est-à-dire trouver le front d'onde incident qui traverse un milieu diffusant et se refocalise au point voulu ? Cette approche, simple et révolutionnaire, se révéla féconde. Le front d'onde de la lumière à envoyer étant inconnu, il utilisa une approche itérative : en jouant sur chaque pixel d'entrée du modulateur spatial pour trouver la valeur optimisant l'intensité lumineuse au point voulu de l'autre côté du milieu opaque, il obtint un point 1 000 fois plus brillant que son voisinage *(voir la figure 2)*. Comme en optique adaptative, il avait en pratique « corrigé » le front d'onde et récupéré une tache de diffraction parfaite, mais en traversant un milieu opaque.

Les travaux presque simultanés des équipes de C. Yang et de A. Mosk firent grand bruit dans la communauté de l'optique : contrairement à l'opinion communément admise qu'on ne pouvait rien faire de la lumière diffusée et qu'on serait toujours limité aux couches superficielles des milieux diffusants, ces deux expériences montraient que la lumière diffusée pouvait être manipulée et exploitée.

À l'Institut Langevin, à Paris, nous avons poussé le concept plus loin. Nous avons déterminé la matrice de transmission lumineuse d'un milieu opaque « idéal », une couche de peinture blanche. Ce milieu diffusant est complexe, mais linéaire, de sorte que l'on peut caractériser son comportement optique sous la forme d'une matrice (un tableau de nombres) de très grande taille, sa matrice de transmission. Pour la mesurer, nous avons envoyé une série de fronts d'onde connus sur le milieu, grâce à un modulateur spatial. Simultanément, nous mesurions le résultat de la transmission avec une

## ✔ BIBLIOGRAPHIE


T. Cizmar *et al.*, **In situ wavefront correction and its application to micromanipulation**, *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 388-394, 2010.

S. M. Popoff *et al.*, **Measuring the transmission matrix in optics : an approach to the study and control of light propagation in disordered media**, *Physical Review Letters*, vol. 104, article 100601, 2010.

I. M. Vellekoop *et al.*, **Exploiting disorder for perfect focusing**, *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 320-322, 2010.

Z. Yaqoob *et al.*, **Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples**, *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 110-115, 2008.

J. Hardy, **L'optique adaptative**, *Pour la Science*, n° 202, août 1994.

M. D. Levenson, **High-resolution imaging by wave-front conjugation**, *Optics Letters*, vol. 5, pp. 182-184, 1980.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

caméra CCD ; nous avons ainsi obtenu la matrice de transmission du milieu entre 1 024 pixels du modulateur et 1 024 pixels de la caméra. Il faut quelques minutes pour obtenir cette matrice, mais une fois cette dernière connue, nous sommes capables de focaliser presque instantanément une onde lumineuse à travers le milieu sur un ou plusieurs pixels de la caméra, comme en conjugaison de phase.

## L'avenir de l'imagerie : voir dans les tissus

Peut-on aller au-delà de la conjugaison de phase et reconstruire une image ? Et, si c'est le cas, comment ? Il suffit d'encoder une image avec le modulateur spatial, comme si la lumière éclairait un objet. La lumière diffuse alors dans le milieu et forme une tache de diffusion. Connaissant la matrice de transmission du milieu, nous avons inversé numériquement la diffusion et retrouvé l'image de départ avec une précision de 95 pour cent. En mesurant la matrice de transmission d'un milieu, qui détermine comment la lumière traverse le milieu, nous pouvons donc non seulement focaliser, mais aussi transmettre des images à travers les milieux diffusants.

De nombreux groupes, en Europe, aux États-Unis et en Corée, se sont engouffrés dans la brèche et, depuis trois ans, des progrès sont réalisés à un rythme soutenu. Par exemple, le contrôle de front d'onde a été appliqué avec succès aux pinces optiques (qui permettent de manipuler de petits objets, par exemple des billes), à la focalisation dans les milieux diffusants et à l'imagerie de fluorescence avec une résolution inférieure à 100 nanomètres. Récemment, trois équipes, en Hollande, puis en Israël et en France, ont montré qu'on pouvait également contrôler temporellement une impulsion femtoseconde à travers un milieu diffusant, ajoutant la composante temporelle à la composante spatiale (*voir l'article* Façonner la lumière pour contrôler la matière *dans ce numéro*).

Quelles sont les prochaines étapes ? Pour l'imagerie des milieux biologiques, le facteur crucial est l'accélération de la technique, l'objectif étant de trouver le front d'onde optimal plus vite que le milieu ne change. Toutes les équipes se cantonnent pour l'instant à des milieux modèles, telle une couche de peinture blanche, très diffusante, mais surtout très stable pendant des dizaines de minutes. Quelques techniques arrivent à focaliser la lumière en une seconde environ, mais il faudra encore gagner un facteur 1 000 si l'on veut utiliser cette méthode dans un milieu biologique vivant (ces derniers étant considérés stables sur une milliseconde environ). Des matrices de micromiroirs actionnés mécaniquement ne sont pas aussi développées que les systèmes à cristaux liquides, mais ont le potentiel pour atteindre ces vitesses.

L'autre défi pour l'imagerie est d'aller voir à l'intérieur des tissus biologiques, et pas seulement à travers. C'est en théorie et en pratique possible, mais la technique permettant d'obtenir une image en profondeur et pas seulement à travers un milieu opaque n'est pas encore au point. Peut-être utilisera-t-on une bille fluorescente, des ultrasons, des boîtes quantiques… Des expériences préliminaires explorent déjà ces pistes. Les concepts pour contrôler la lumière dans les milieux complexes sont validés et les enjeux sont considérables ; gageons que nous verrons des progrès rapides dans les prochaines années. ■

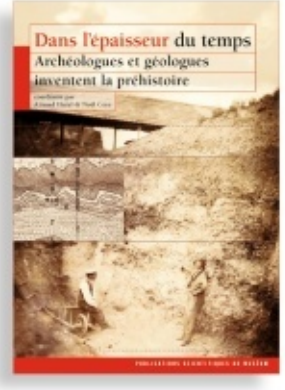

Muséum national d'Histoire naturelle

**Dans l'épaisseur du temps**

**Archéologues et géologues inventent la préhistoire**

Arnaud **Hurel** & Noël **Coye**
**coordinateurs**

C'est autour de l'année 1859 que la préhistoire s'affirme, à l'échelle de l'Europe, comme un domaine de recherche nouveau et fécond. Les grandes disciplines des sciences naturelles (géologie, paléontologie…) et des sciences de l'homme (archéologie, histoire, philologie…) participent à la création de cette nouvelle science à travers les débats fondateurs portant sur l'ancienneté de l'homme et sur son origine animale. En une décennie, c'est toute la conception des origines de l'humanité qui s'en trouve bouleversée de façon profonde et durable au moment même où se diffuse la théorie darwinienne de l'évolution. Cet ouvrage propose une relecture de cette période primordiale de l'histoire de l'archéologie préhistorique. Pour cela, il s'intéresse non seulement aux découvertes et aux idées qui ont nourri la connaissance mais également aux acteurs (chercheurs officiels et amateurs) et aux institutions (congrès, revues, sociétés savantes, musées, Muséum…) qui ont porté son développement et son rayonnement. Cette étude se place en continuité avec les démarches actuelles de la recherche sur les premières industries du Nord de la France et de la muséologie de la préhistoire.




ISBN 978-2-85653-666-7
170 x 240 mm • 120 fig. quadri
442 p. • 35 € TTC • mai 2011

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

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

Histoire des sciences

# Lumière sur l'infiniment PETIT

Rémi Carminati et Yannick De Wilde

**Des ondes lumineuses évanescentes, qui disparaissent très rapidement, permettent d'observer un objet avec une précision de quelques nanomètres. D'autres techniques de super-résolution utilisent par exemple la fluorescence.**

L'œil humain est en général capable de détecter un détail d'environ un millimètre sur un objet situé à trois mètres de distance. C'est la limite de résolution de l'œil, à savoir la distance minimale qui doit exister entre deux points proches pour qu'ils soient discernables. La loupe ou le microscope classique ont des pouvoirs de résolution supérieurs, mais ils ne permettent pas de distinguer des détails de l'ordre du nanomètre. Pourtant, les nanotechnologies et l'imagerie du vivant imposent aujourd'hui d'atteindre cette échelle d'observation.

Tout système optique formant une image, par exemple un appareil photographique, une caméra, un microscope ou un télescope, collecte la lumière provenant de l'objet observé et produit sur un écran (une pellicule photographique, un réseau de capteurs CCD ou la rétine de l'observateur) une distribution spatiale d'intensité lumineuse. C'est ce que l'on nomme l'image. Soit l'objet, telle une flamme ou une étoile, produit directement la lumière collectée, soit il la réémet, la réfléchit ou la diffuse, soit il est éclairé par une source externe.

## L'ESSENTIEL

- La diffraction de la lumière impose une limite de résolution aux microscopes classiques.
- Pour observer des détails de l'ordre du nanomètre, il faut détecter les ondes dites évanescentes qu'un objet réémet. Ces ondes n'existent qu'à des distances inférieures à la longueur d'onde d'éclairement.
- Le microscope en champ proche peut détecter ces ondes et les images obtenues ont une résolution de quelques nanomètres.
- Avec un microscope classique, des physiciens mettent au point d'autres techniques de super-résolution.

Les lois de l'optique géométrique assimilent la lumière à un ensemble de rayons, et cette approche permet de comprendre comment fonctionnent les appareils d'imagerie. Toutefois, les performances de ces instruments reposent sur le fait que la lumière est une onde électromagnétique.

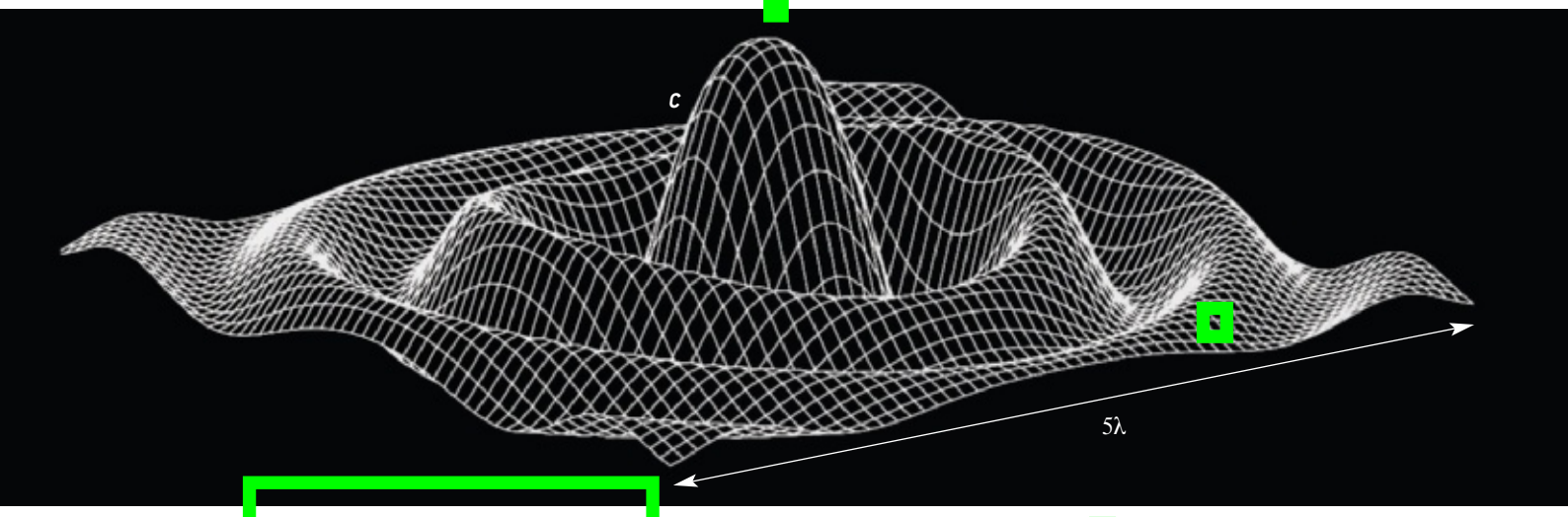
D'une part, la nature ondulatoire de la lumière impose une limite de résolution spatiale aux systèmes d'imagerie classiques (de l'ordre de la longueur d'onde). D'autre part, la physique des ondes permet aux scientifiques de concevoir de nouvelles approches pour réaliser des images au-delà de cette limite. C'est la super-résolution. Ainsi, nous allons examiner comment la microscopie optique est capable de dépasser la limite de diffraction en détectant des ondes dites évanescentes, et voir que, même avec un microscope classique, il est possible d'obtenir des images super-résolues en utilisant la fluorescence.

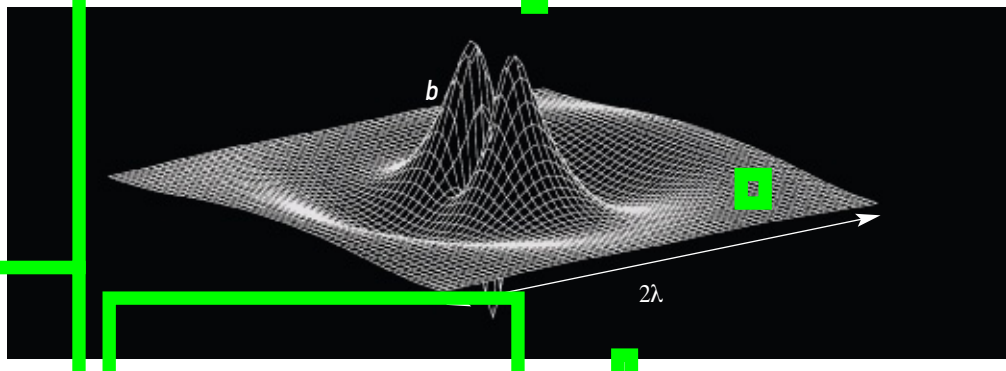
## La limite de diffraction

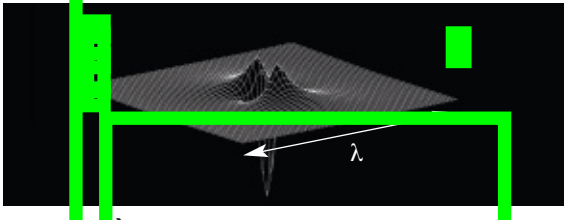
Une onde est caractérisée par une échelle spatiale naturelle : sa longueur d'onde $\lambda$. Lorsque deux ondes de même longueur d'onde $\lambda$ se propageant en sens inverse se superposent, la figure d'intensité lumineuse obtenue présente des franges d'interférences de période $\lambda/2$. Ainsi, en superposant des ondes de longueur d'onde $\lambda$, on crée une figure d'intensité dont l'échelle caractéristique la plus petite est $\lambda/2$. C'est cette échelle qui donne la plus petite variation



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




Rémi Carminati

**1. UNE SPHÈRE** de taille inférieure à la longueur d'onde λ d'éclairement réémet des ondes propagatives et des ondes évanescentes. À courte distance – en champ proche, à une distance de 0,05 λ *(a)* et à 0,1 λ *(b)* –, les ondes évanescentes contribuent beaucoup à la distribution d'intensité lumineuse qui présente des variations à des échelles petites devant λ, ce qui permet la super-résolution. À grande distance – en champ lointain, à une distance au moins égale à λ *(c)* –, ces ondes laissent la place aux ondes propagatives qui ne produisent que des variations d'intensité à des échelles supérieures à λ/2. La figure obtenue résulte de l'interférence de l'onde éclairant la sphère avec les ondes qu'elle réémet.

tion spatiale visible dans une image produite avec des ondes. On parle de limite de diffraction ; celle-ci est liée au fait qu'on ne peut pas confiner spatialement une onde sans influer sur sa propagation, ce qui est le fondement même du phénomène de diffraction *(voir l'encadré page 52)*. En conséquence, un microscope optique classique est limité à une résolution spatiale de l'ordre de $\lambda/2$, où $\lambda$ est la longueur d'onde utilisée pour former l'image.

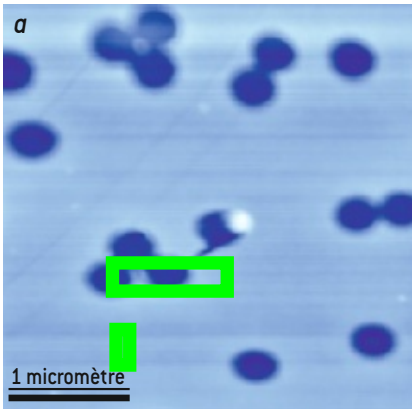
Cette résolution est de l'ordre de 200 nanomètres en lumière visible (dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nanomètres). Un microscope électronique à balayage est aussi limité par la diffraction, mais c'est la longueur d'onde de de Broglie des électrons (associée à leur nature quantique et beaucoup plus courte que les longueurs d'onde optiques) qui permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du nanomètre. Un télescope est limité à une résolution angulaire (permettant de séparer angulairement deux étoiles) de l'ordre de $\lambda/D$, où $D$ est son diamètre et $\lambda$ la longueur d'onde d'observation. Un échographe ultrasonore pour l'imagerie du corps humain a une résolution de l'ordre du millimètre, correspondant à la longueur d'onde des ondes acoustiques utilisées.

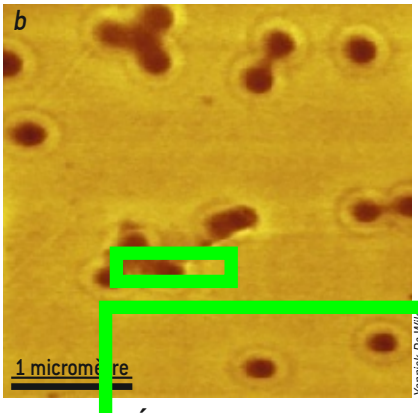
De nombreux instruments d'imagerie utilisant des ondes présentent donc cette limite de résolution. Peut-on envisager d'aller au-delà ? Oui, mais à condition de repenser le processus même de formation de l'image.

Pour améliorer la résolution spatiale d'un système d'imagerie, il faut rendre visibles des structures spatiales plus petites que $\lambda$ dans la distribution d'intensité collectée. La physique des ondes offre cette possibilité, par le biais du profil d'intensité lumineuse dans la zone dite de champ proche. Dans cette zone, certaines ondes créées par l'objet peuvent produire des variations spatiales d'intensité bien inférieures à $\lambda/2$ *(voir la figure 1)*. Mais ces ondes disparaissent de façon exponentielle lorsqu'on s'éloigne de l'objet : elles sont évanescentes et ne peuvent être détectées qu'à des distances de l'objet très inférieures à la longueur d'onde (d'où l'expression « champ proche »).

Au-delà de cette zone, les ondes évanescentes ne participent plus à la formation des images, et on retrouve la limite de diffraction. La transition a lieu sur une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière, ce qui complique les techniques d'acquisition d'images en champ proche.

Pour obtenir le profil d'intensité des ondes dans la zone de champ proche et former une image super-résolue, on utilise un nano-objet dont la taille est inférieure à la longueur d'onde $\lambda$ du laser qui éclaire l'échantillon étudié. Placé tout près de la surface de ce dernier, un tel nano-objet est éclairé par les ondes évanescentes produites par l'échantillon et réémet (par




Yannick De Wilde

**2. UN FIL MÉTALLIQUE** percé de nanocratères et déposé sur un substrat de verre est observable en microscopie optique en champ proche. On a enregistré une image topographique *(a)* et une image optique super-résolue de l'échantillon *(b)*. Le fond des cratères laisse apparaître le verre *(a, en bleu foncé; b, en marron)*. L'image super-résolue révèle des détails de 50 nanomètres, alors que la longueur d'onde d'observation [illegible]

diffusion) des ondes dites propagatives : elles se propagent loin et leur intensité est proportionnelle à celle des ondes qui l'éclairent. Un objet de taille sub-longueur d'onde se comporte donc comme une sonde locale de l'intensité des ondes présentes dans la zone de champ proche, ici les ondes évanescentes émises par l'échantillon étudié.

En mesurant l'intensité de la lumière diffusée par cette sonde que l'on déplace précisément pour balayer tout l'objet, on peut déterminer le profil d'intensité des ondes à la surface de l'objet. Ce profil présente lui des variations spatiales sur des échelles très petites devant λ, avec une limite inférieure déterminée par la taille de la sonde locale diffusante et par la distance entre deux points où l'on mesure l'intensité diffusée, et non plus par λ comme c'est le cas dans un microscope classique.

## Voir dans le champ proche

L'application de ce concept de sonde locale diffusante du champ proche permet la réalisation d'images optiques super-résolues : la sonde locale détecte les variations spatiales de l'intensité des ondes évanescentes qui représentent une source d'information sur les détails plus petits que λ. Reste à mettre en œuvre ce concept.

Pour réaliser des images super-résolues dans le domaine spectral du visible ou de l'infrarouge (la longueur d'onde étant comprise entre environ [illegible] nanomètres et 10 micromètres), la taille de la sonde locale diffusante ne doit pas dépasser quelques dizaines de nanomètres. Et l'on doit maintenir cet objet diffusant à une distance nanométrique de la surface d'un échantillon éclairé par un laser et en contrôler précisément la position pour balayer toute la zone. Optiquement, le problème est aussi complexe : un objet de taille nanométrique diffuse une lumière dont l'intensité est faible. Cela impose un montage optique collectant bien la lumière diffusée et équipé d'un détecteur sensible. Un instrument réalise ce tour de force et capte les ondes évanescentes pour former des images super-résolues : c'est le microscope optique en champ proche (ou SNOM pour *Scanning Near-field Optical Microscopy*, *voir l'encadré page 54*).

Inventé en 1984 par le physicien Dieter Pohl et son équipe dans les laboratoires d'IBM à Zurich, le microscope optique en champ proche est un microscope à sonde locale à balayage de la même famille que le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique. Tous ces microscopes sont équipés d'une sonde en forme de pointe dont on peut contrôler avec une précision inférieure au nanomètre la position de l'échantillon et de la pointe, grâce à des déplacements piézo-électriques commandés par ordinateur et associés à une électronique d'asservissement.

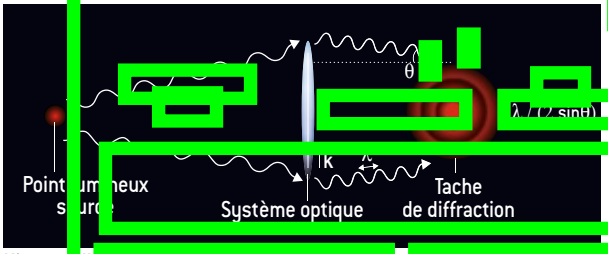
Les forces d'interaction de la pointe et de la surface de l'échantillon dans un microscope optique en champ proche produisent une déflexion du levier qui supporte

## LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE

Depuis l'invention du microscope optique au XVI[e] siècle, les scientifiques se sont heurtés à une difficulté : la résolution avec laquelle on voit un objet est limitée à cause de la diffraction de la lumière. En effet, l'image d'un point par un instrument d'optique n'est pas un point, mais une tache circulaire nommée tache d'Airy ou de diffraction. Si deux points distincts sont trop rapprochés, leurs images peuvent se recouvrir [illegible] donc une limite à la résolution en optique. Mais d'où vient cette limite de diffraction ?

L'image d'un point lumineux est obtenue en focalisant des ondes électromagnétiques propagatives, qui interfèrent dans le plan image. Le vecteur d'onde transverse le plus grand est $k = 2\pi/\lambda \sin\theta$, θ étant l'angle d'ouverture du système d'imagerie. L'ensemble des vecteurs d'onde transverses accessibles est d'étendue $\Delta k = 4\pi/\lambda \sin\theta$. En physique ondulatoire, l'étendue en vecteurs d'onde $\Delta k$ et l'étendue spatiale $\Delta r$ de la figure de diffraction sont reliées par la relation fondamentale : $\Delta r \Delta k > 2\pi$. On a donc : $\Delta r > \lambda/2 \sin\theta$), ce qui fixe la taille de la tache de diffraction. Quand l'ouverture numérique du système optique est maximale ($\sin\theta = 1$), on obtient une tache de diffraction dont le diamètre est égal à λ/2.

Si l'on traite la lumière d'un point de vue quantique comme un ensemble de photons qui se propagent de la source au détecteur, chaque photon a une quantité de mouvement $p = (h/2\pi)k$, où h est la constante de Planck. La relation fondamentale devient : $\Delta r \Delta p > h$. C'est l'expression du principe d'incertitude de Heisenberg, selon lequel on ne peut mesurer simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule. La limite de diffraction [illegible] conséquence de ce principe, et du fait que l'étendue $\Delta p$ est limitée par le système d'imagerie.




L'image d'un point lumineux à travers un système optique est une tache de diffraction d'étendue spatiale $\lambda/(2\sin\theta)$, où λ est la longueur d'onde et θ l'angle d'ouverture du système d'imagerie.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

la pointe. La mesure de cette déflexion injectée dans une boucle d'asservissement maintient la pointe en contact ou à une distance constante de quelques nanomètres de la surface de l'échantillon, en agissant sur l'élément piézoélectrique. Un balayage complet de l'échantillon sous la pointe donne, grâce à un ordinateur, une image topographique de la surface.

Dans le microscope optique en champ proche, un laser éclaire la région de l'échantillon où se trouve la pointe. Si des structures sub-longueurs d'onde sont présentes dans cette région, elles produisent des ondes évanescentes qui restent confinées dans la zone de champ proche. La sonde locale diffusante, de taille inférieure à la longueur d'onde du laser et située à l'extrémité de la pointe du microscope, convertit ces ondes évanescentes en ondes propagatives.

## Ondes évanescentes et super-résolution

On distingue trois types de microscope optique en champ proche, selon la sonde diffusante qu'ils utilisent. Chacune correspond à un objet de taille très inférieure à la longueur d'onde d'éclairement ; il s'agit soit de la pointe même du microscope, jouant le rôle d'un diffuseur sphérique, soit d'une nano-ouverture à l'extrémité d'une fibre optique étirée en forme de pointe, soit d'un nano-objet fluorescent (une molécule, un nano-cristal, etc.) collé au bout d'une pointe. Le choix de l'une ou l'autre de ces approches dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'onde du laser, les conditions d'éclairement, la façon dont on souhaite collecter la lumière, etc.

La lumière émise par la sonde locale diffusante au bout de la pointe du microscope se propage et est collectée à l'aide d'une lentille ou de l'objectif d'un microscope dans le cas des microscopes à pointe diffusante et à sonde fluorescente, ou à l'aide d'une fibre optique dans le cas du microscope à ouverture. Puis elle est focalisée sur un détecteur optique qui mesure son intensité.

L'élément important dans ces microscopes est que l'on connaît avec une précision nanométrique la position du nano-objet diffusant les ondes à la surface de l'échantillon. En outre, l'intensité de la lumière diffusée loin du nano-objet et dirigée vers le détecteur est proportionnelle à l'intensité de la lumière qu'il reçoit dans la zone de champ proche, à laquelle contribuent les ondes évanescentes. Elle peut être mesurée selon la position de la sonde sur la surface de l'échantillon.

Ainsi, en mesurant cette intensité pendant le balayage de la pointe sur la surface de l'échantillon, on enregistre point par point une image optique super-résolue de la zone balayée, dont la résolution ne dépend que de la taille du nano-objet utilisé comme sonde locale d'intensité dans la zone de champ proche, et de la distance entre deux points de mesure. L'image optique super-résolue est enregistrée en même temps que l'image topographique. Ces deux images fournissent deux informations différentes qui peuvent être comparées ; la première est liée aux variations spatiales d'intensité optique à la surface de l'échantillon sur des échelles sub-longueur d'onde, la seconde au relief de l'échantillon.

À quoi sert la microscopie optique en champ proche ? Un domaine d'application important est l'étude des propriétés optiques de nanomatériaux à la surface d'un échantillon. Il est parfois nécessaire de connaître les propriétés optiques d'un matériau à une longueur d'onde λ, alors que l'étendue spatiale de ce matériau est inférieure à λ. Dans ce cas, l'utilisation d'un microscope conventionnel est proscrite, car sa résolution spatiale (λ/2) est insuffisante.

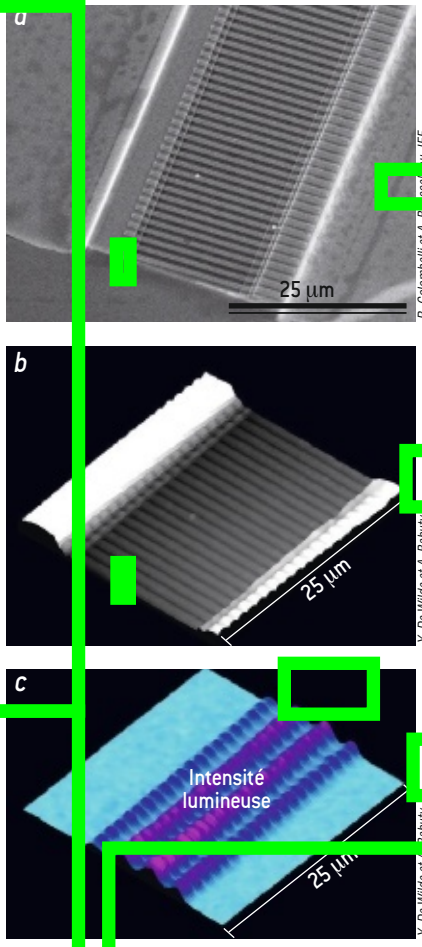
Le microscope optique en champ proche apporte une solution à ce problème. Le contraste optique dans une image super-résolue résulte du fait que l'intensité de la lumière qui arrive sur le détecteur dépend des propriétés optiques du matériau situé sous la sonde locale diffusante. Une partie des ondes arrivant sur le détecteur provient de l'image de la sonde diffusante, de sorte que l'intensité varie selon la nature du matériau situé sous la pointe pendant le balayage.

Par exemple, avec un microscope optique en champ proche à pointe diffusante fonctionnant dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 10,6 micromètres, nous avons obtenu l'image optique d'un film métallique de chrome (réfléchissant dans l'infrarouge), percé de trous circulaires d'environ 200 nanomètres de diamètre laissant apparaître le substrat de verre (absorbant dans l'infrarouge, *voir la figure 2*). L'image montre que ce microscope est capable de distinguer les deux matériaux avec une résolution spatiale bien meilleure que celle imposée par la diffraction.


LES AUTEURS

Rémi CARMINATI est professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech) où il dirige le Laboratoire d'optique physique. Il est le directeur adjoint de l'Institut Langevin.

Yannick DE WILDE est directeur de recherche du CNRS à l'Institut Langevin.


**3. À LA SURFACE DU RÉSEAU MÉTALLIQUE** de sa cavité *(a, en microscopie électronique)*, un laser à semi-conducteur produit des ondes évanescentes sous la forme de plasmons. Un microscope optique en champ proche enregistre simultanément une image topographique *(b)* et une image optique super-résolue *(c)* de la surface du dispositif pendant qu'il émet un rayonnement laser. L'image topographique révèle la structure du réseau métallique, tandis que l'image optique montre la répartition spatiale des ondes évanescentes sur le dispositif.

## ✔ BIBLIOGRAPHIE


A. Babuty *et al.*, **Semiconductor surface plasmon sources**, *Physical Review Letters*, vol. 104, article 226806, 2010.

R. Heintzmann et M. G. Gustafsson, **Subdiffraction resolution in continuous samples**, *Nature Photonics*, vol. 3, p. 362, 2009.

E. Betzig *et al.*, **Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution**, *Science*, vol. 313, p. 1642, 2006.

L. Aigouy, Y. De Wilde et C. Frétigny, **Les nouvelles microscopies : à la découverte du nanomonde**, Belin, 2006.

C. Boccara et R. Carminati, **Champ proche optique de l'expérience à la théorie**, *Les nanosciences : nanotechnologies et nanophysique*, Belin, 2004.

J. J. Greffet et R. Carminati, **Image formation in near-field optics**, *Progress in Surface Science*, vol. 56, p. 133, 1997.


Un autre domaine d'application de la microscopie en champ proche est la réalisation d'images d'ondes évanescentes à la surface de guides d'ondes. Quand des ondes se propagent dans un prisme transparent (dont l'indice optique est supérieur à un) et subissent une réflexion totale à la surface interne de ce prisme, elles produisent des ondes réfléchies propagatives qui poursuivent leur route dans le prisme. La réflexion engendre aussi des ondes dans l'air sur la surface externe du prisme, mais ces ondes ne se voient pas : elles sont évanescentes, c'est-à-dire qu'elles décroissent rapidement à la surface du prisme sans qu'aucune composante propagative qui permettrait de les observer en se plaçant loin de la surface du prisme n'y soit associée.

Un phénomène analogue a lieu quand des ondes se propagent dans un guide d'onde diélectrique (d'indice optique supérieur à un). Les ondes propagatives confinées dans le guide se prolongent dans l'air à la surface du guide sur une distance de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde, sous la forme d'ondes évanescentes. Des ondes peuvent également se propager sur des surfaces métalliques et présentent dans ce cas un caractère évanescent à la fois dans l'air et dans le métal. On les nomme des plasmons (polaritons) de surface. Ces ondes qui restent naturellement confinées à la surface lorsqu'elles se propagent sur une piste métallique suscitent aujourd'hui beaucoup d'intérêt, car elles devraient permettre la réalisation de nouveaux types de dispositifs d'optique intégrée. Le microscope optique en champ proche est capable de caractériser la propagation des ondes évanescentes à la surface de ces structures guidantes.

Qui plus est, le microscope optique en champ proche présente un intérêt dans des domaines situés à l'interface de la recherche fondamentale et appliquée. En 2011, nous avons observé des dispositifs lasers semi-conducteurs (conçus par l'équipe de Raffaele Colombelli à l'Institut d'électronique fondamentale du CNRS et de l'Université Paris Sud), avec un microscope en champ proche fonctionnant dans l'infrarouge. Ces dispositifs produisent des plasmons à la surface du réseau métallique situé sur la cavité du laser, l'émission du laser vers l'extérieur se faisant par les deux extrémités de la cavité.

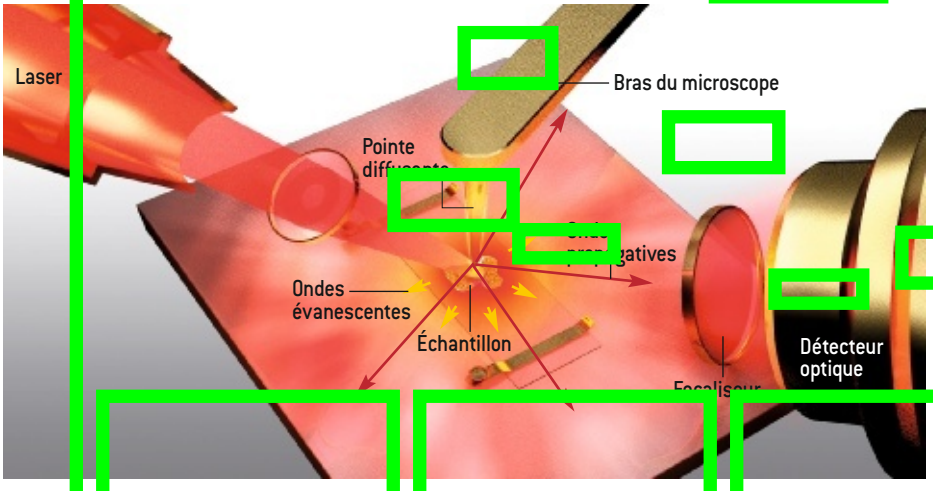
Le microscope en champ proche donne une image super-résolue des plasmons de

### LE MICROSCOPE OPTIQUE EN CHAMP PROCHE

Ce microscope détecte des ondes dites évanescentes, uniquement présentes à des distances de l'échantillon très inférieures à la longueur d'onde d'observation. La sonde utilisée se termine par une pointe de taille nanométrique qui réalise une cartographie du champ proche. Des translations piézo-électriques contrôlées par ordinateur déplacent la pointe avec précision. Un faisceau laser de longueur d'onde λ est focalisé sur la zone de l'échantillon où se trouve l'extrémité de la pointe, ce qui produit des ondes évanescentes près de tout objet de taille inférieure à λ se trouvant dans la zone éclairée. On balaye l'échantillon latéralement sous la pointe maintenue à distance constante de la surface grâce au dispositif d'asservissement qui agit sur sa position verticale.

L'enregistrement de la position verticale de la pointe en chaque point de la zone balayée donne une image topographique, qui renseigne sur le relief de l'échantillon. Par ailleurs, les ondes évanescentes présentes à la surface de l'échantillon sont diffusées à l'extrémité de la pointe pendant le balayage. Comme elles subissent des diffusions, elles deviennent classiques, lesquelles sont collectées et focalisées sur un détecteur optique. L'enregistrement de l'intensité du signal selon la position de la pointe à la surface de l'échantillon pendant le balayage fournit une image optique de l'échantillon. La résolution est principalement de la taille de l'extrémité de la pointe, de quelques nanomètres.

Différentes sondes en forme de pointe sont utilisées pour diffuser les ondes évanescentes dans la zone de champ proche. Le choix de la sonde dépend des conditions expérimentales, telles que la longueur d'éclairement, la façon dont la lumière est collectée, etc.




Ces images montrent une image topographique et une image optique de l'échantillon avec une résolution de quelques nanomètres.

Olivier Rorantz



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# Alimentation – santé – technologies alimentaires

**Danger dans l'assiette**
Sylviane Dragacci, Nadine Zakhia-Rozis, Pierre Galtier

Pour décrypter les dangers alimentaires liés aux moisissures toxiques, les mycotoxines.

2011, 184 p. - **25 €**

**Manger sans risques**
Vincent Leclerc

Les clés pour manger sans risques au quotidien.

2011, 200 p. - **22 €**

**Quand le raisin se fait vin**
Pascale Scheromm

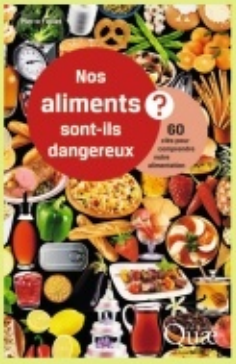
De la transformation du fruit en nectar des dieux, histoire et techniques.

2011, 160 p. - **20 €**

**Bonnes bactéries et bonne santé**
Gérard Corthier

Et si pour vivre nous avions besoin de bactéries ?

2011, 128 p. - **19 €**




**Nos aliments sont-ils dangereux ?**
**60 clés pour comprendre notre alimentation**
Pierre Feillet

Les clés pour mieux comprendre le « système alimentaire », celui qui débute dans les champs et se termine dans notre corps.

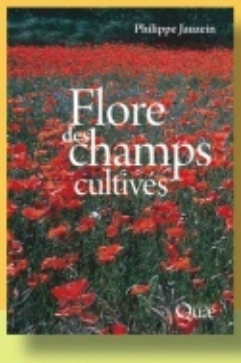
2011, 224 p. - **22 €**

# Botanique

**La flore d'Île de France**
Philippe Jauzein, Olivier Nawrot

Un bilan exhaustif de la flore sauvage de la région d'Ile de France.
LA référence scientifique.

2011, 972 p. couleurs - 129 €
**Prix de lancement, 99 €** jusqu'au 31/12/2011




**Flore des champs cultivés**
Philippe Jauzein

Incontournable pour déterminer les plantes herbacées dans les parcelles agricoles.

2011 - 898 pages - **59,00 €**

# Pour les chercheurs

**Guide de rédaction scientifique**
L'hypothèse, clé de voûte de l'article scientifique
David Lidsay, adaptation française de Pascal Poindron

Le rôle primordial de l'hypothèse formulée en amont de la recherche pour réussir la communication scientifique.

2011, 184 p. - **15,00 €**

**Microscopie des plantes consommées par les animaux**
Jocelyne Rech

Une méthode originale et simple d'identification des espèces végétales, à partir de fragments de feuilles, de graines, de fruits ou d'écorces.

2011, 312 p. - **49,00 €**

# Science et Société

**Toréer sans la mort ?**
Jocelyne Porcher, Carlos Pereira, coord.

La tauromachie sous l'angle du travail avec les animaux. Qu'apporte la mort de l'animal à cet art controversé ?

2011, 328 p. - **39 €**

Catalogue complet sur **www.quae.com**
Éditions Quæ – c/o INRA – RD 10 – 78026 Versailles Cedex

éditions Quæ

surface, alors qu'aucune lumière émise sur la cavité du laser ne peut être observée sans la sonde locale diffusante. En général, les études menées dans l'industrie pour caractériser l'émission d'un laser semi-conducteur portent sur son spectre et la qualité du faisceau qu'il produit à grande distance. L'image super-résolue que nous avons obtenue montre que le microscope en champ proche permet d'aller plus loin : en étudiant la distribution spatiale des ondes évanescentes sur la cavité du laser en fonctionnement, nous déterminons celle des ondes dans la cavité *(voir la figure 3)*. Cette information est importante pour la fabrication de tels dispositifs.

## La super-résolution en champ lointain

Les techniques de microscopie en champ proche sont au cœur de l'optique sub-longueur d'onde et ont donné naissance au domaine de la nano-optique. Toutefois, de récentes études ont montré que des images super-résolues peuvent être formées quand on utilise des instruments fonctionnant en champ lointain et donc limités par la diffraction, en particulier des microscopes optiques classiques. Illustrons deux principes de ces nouvelles approches, dans le cadre de l'imagerie de fluorescence.

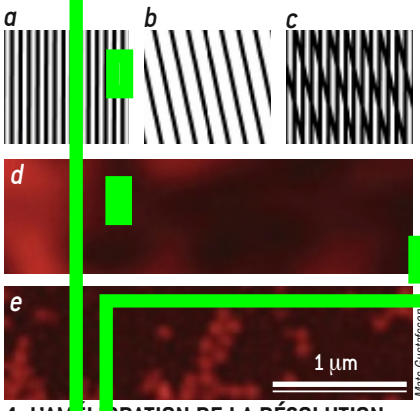
En imagerie de fluorescence, on enregistre la distribution spatiale d'émetteurs fluorescents ou fluorophores, souvent des molécules organiques, répartis dans l'échantillon. L'imagerie en biologie étant le champ d'application privilégié de ces techniques, les échantillons sont en général des cellules ou des tissus vivants. L'intensité de la lumière fluorescente émise est proportionnelle au produit de la densité de fluorophores ($n(r)$, $r$ étant la position du point observé dans l'échantillon) et de l'intensité incidente $I_{inc}$ provenant de la source extérieure, un laser la plupart du temps.

Lorsqu'on forme l'image de l'intensité de fluorescence émise avec un microscope classique, la résolution est limitée à environ $\lambda/2$, où $\lambda$ est la longueur d'onde de fluorescence. Une première approche pour améliorer la résolution est d'éclairer l'échantillon avec une intensité non uniforme. On parle alors de microscopie par « éclairement structuré ». Grâce au produit $n(r)\, I_{inc}(r)$, tout en ne détectant dans l'intensité de fluorescence que des variations spatiales supérieures à $\lambda/2$, on a accès à des informations sur la distribution des fluorophores à des échelles plus petites. Le principe repose sur un analogue de l'effet Moiré : en structurant l'intensité incidente à une échelle de $\lambda/2$, on gagne un facteur deux en résolution, limitée alors à $\lambda/4$ *(voir la figure 4)*. En utilisant la réponse non linéaire des fluorophores, due à la saturation de l'émission fluorescente, on peut même aller au-delà de $\lambda/4$ et atteindre des résolutions de quelques dizaines de nanomètres.

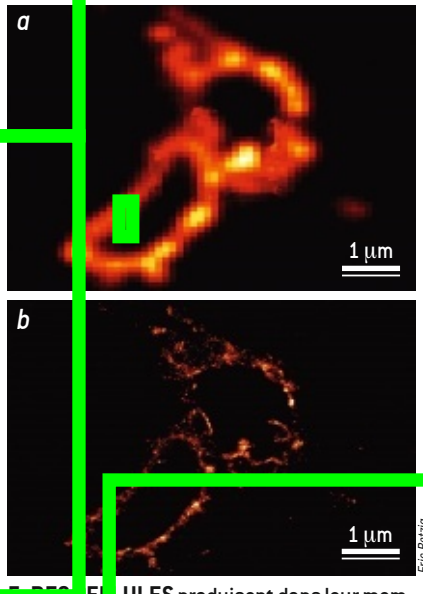
Une autre approche consiste à former des images super-résolues en ne détectant l'émission que d'un seul fluorophore à la fois. En effet, même avec un microscope classique, on peut localiser une source unique avec précision en déterminant le maximum de la tache de diffraction produite. Même si la tache a une taille de l'ordre de $\lambda/2$, on peut localiser son maximum avec une précision inférieure à $\lambda/2$ si le rapport signal sur bruit est suffisant et si le détecteur a des pixels assez petits pour enregistrer précisément la tache de diffraction. La limite est alors contrôlée par le bruit de fond, et non par la longueur d'onde.

Mais quand l'échantillon contient un grand nombre de fluorophores, comment faire en sorte qu'un seul émette à la fois ? En 2006, deux équipes ont répondu à la question en obtenant des images super-résolues de distribution de fluorophores dans des cellules biologiques. Elles ont utilisé des fluorophores photo-activables : excitées par un laser, ces particules émettent seulement quand une impulsion produite par un autre laser de longueur d'onde différente les rend activables. À chaque instant, une seule source émet dans une zone de taille limitée par la diffraction, on peut localiser cette source avec précision en utilisant un microscope classique *(voir la figure 5)*. En enregistrant les positions de chaque source on réalise une image de la distribution des fluorophores avec une résolution bien inférieure à $\lambda$. Mais la technique est limitée par la probabilité faible d'avoir deux sources émettant en même temps tout en étant séparées de moins de $\lambda/2$.

Ces nouvelles approches en champ proche et en imagerie de fluorescence permettent aujourd'hui aux scientifiques d'obtenir des images avec une résolution spatiale de l'ordre de quelques nanomètres. En imagerie optique, l'exploitation des lois de la physique sous de nouveaux angles permet encore de spectaculaires progrès.




**4. L'AMÉLIORATION DE LA RÉSOLUTION** en microscopie de fluorescence par éclairement dit structuré repose sur l'effet de moiré. En combinant l'objet *(a)* avec une illumination structurée *(b)*, on obtient dans l'image un motif de grande période *(c)* qui peut être détecté par un système limité par la diffraction. En connaissant la structuration imposée à la lumière excitatrice, on retrouve à partir du motif les détails de l'objet. Ainsi, des billes fluorescentes de 50 nanomètres sont peu visibles en microscopie classique *(d)*, mais nettes avec un éclairement structuré *(e)*.




**5. DES CELLULES** produisent dans leur membrane des molécules fluorescentes – des fluorophores. En observant ces cellules en microscopie classique de fluorescence *(a)*, on obtient une image de la distribution spatiale des fluorophores avec une résolution limitée à $\lambda/2$, $\lambda$ étant la longueur d'onde de fluorescence. Pour améliorer la résolution, on utilise des fluorophores photoactivables (par une autre source de lumière), que l'on stimule à tour de rôle au cours de cycles de photoactivation. Quand une source isolée émet, on la localise avec précision en repérant le centre de la tache de diffraction qu'elle produit. Au cycle suivant, on peut localiser une autre molécule même si la distance la séparant de la précédente est inférieure à la longueur d'onde. L'image super-résolue *(b)* s'obtient en répétant ce processus.


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# Lavoisier

www.lavoisier.fr/livre/h3223.html

O. BOUCHET, avec la collaboration de H. Sizun et C. Boisrobert
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
336 p., 16 x 24, 2011
ISBN : 978-2-7462-3223-5, **89 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2580.html

P. BESNARD, P.-N. FAVENNEC (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
376 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2580-0, **79 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2557.html

X. BEGAUD (Sous la dir.)
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favenec
320 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2557-2, **80 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2458.html

N. MOREAU
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
232 p., 15,5 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2458-2, **59 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2592.html

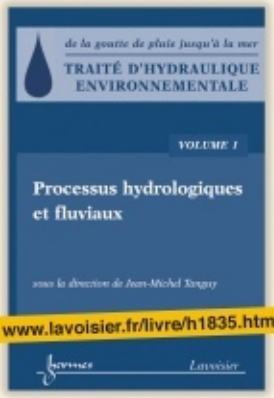
B. DÉMOULIN, P. BESNIER
Collection Télécom, dirigée par Pierre-Noël Favennec
432 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2592-3
**110 €**

www.lavoisier.fr/livre/h1894.html

En 4 volumes
T. BÉCHERRAWY
Les 4 volumes groupés, 2008
ISBN : 978-2-7462-1894-5
**280 €**

www.lavoisier.fr/livre/h1393.html

V. GUINOT
Collection Mécanique des fluides, dirigée par Jean-Luc Achard
392 p., 16 x 24, 2006
ISBN : 2-7462-1393-1, **95 €**




www.lavoisier.fr/livre/h1835.html

En 9 volumes
J.-M. TANGUY
Les 9 volumes groupés, 2010
ISBN : 978-2-7462-1835-2,
**845 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2494.html

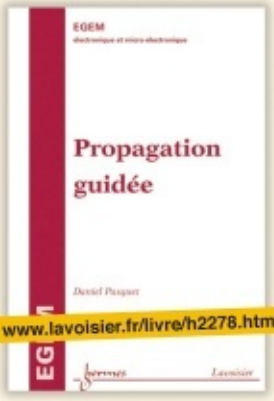
C. RUMELHARD, C. ALGANI, A.-L. BILLABERT
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
416 p., 16 x 24, 2010
ISBN : 978-2-7462-2494-0
**95 €**

www.lavoisier.fr/livre/h1882.html

B. PIETTE
Collection Hyperfréquences, dirigée par Daniel Pasquet
312 p., 16 x 24, 2007
ISBN : 978-2-7462-1882-6
**75 €**

www.lavoisier.fr/livre/h2222.html

En 2 volumes
J.-P. MARAGE, Y. MORI
Les 2 volumes groupés, 2009
ISBN : 978-2-7462-2222-9
**135 €**



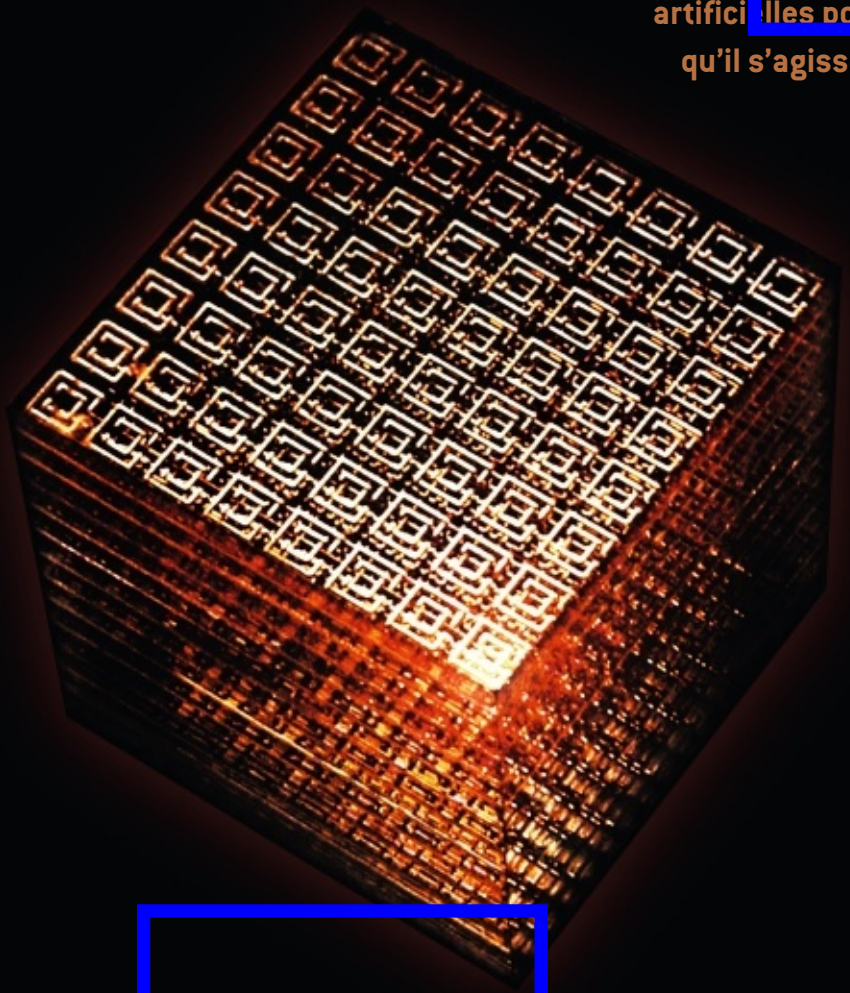

www.lavoisier.fr/livre/h2278.html

D. PASQUET (Sous la dir.)
Série Électronique et micro-électronique (Traité EGEM), dirigée par Robert Baptist et D. Pasquet
350 p., 16 x 24, 2011, relié
ISBN : 978-2-7462-2278-6
**120 €**

# Les ondes sous l'emprise des métamatériaux

Sébastien Guenneau, Stefan Enoch et Ross McPhedran

**Les physiciens élaborent des structures artificielles pour conformer à volonté les ondes, qu'il s'agisse de lumière, de vagues sur la mer ou encore d'ondes sismiques.**



**1. CE DISPOSITIF** est une lentille quasi parfaite pour certaines ondes qu'il transmet sans les déformer. Cet effet résulte de l'agencement calculé de petits circuits élémentaires, des anneaux de cuivre fendus.

Les Grecs anciens avaient imaginé un casque rendant le dieu des enfers invisible : la Kunée d'Hadès. Depuis se succèdent les légendes et les fictions où des « capes d'invisibilité » confèrent à celui qui s'en revêt le pouvoir de disparaître à la vue. Or les physiciens parviennent aujourd'hui à conformer les ondes de façon à escamoter une partie de l'espace. Ils emploient pour cela des structures composées de motifs élémentaires ayant une taille inférieure à la longueur d'onde incidente. Nous allons expliquer comment les chercheurs déduisent ces structures de transformations reliant l'espace réel à un espace virtuel, où une partie de l'espace d'origine a été supprimée. Puis nous évoquerons plusieurs de ces structures que l'on nomme des métamatériaux.

Qu'est-ce exactement qu'un métamatériau ? Le mieux est de répondre à cette question dans le cas le plus spectaculaire : celui des métamatériaux optiques. Pour une onde lumineuse monochromatique, le champ électromagnétique réalise un cycle d'oscillation pour chaque lon-

gueur d'onde parcourue. Il est donc clair que ses interactions avec un matériau seront plus compliquées si la structure de ce dernier comporte des détails de taille inférieure à la longueur d'onde. Or, au sein d'un matériau optique usuel, chaque cube mesurant une longueur d'onde lumineuse de côté contient des milliards d'atomes ou de molécules. On peut donc en général considérer que les propriétés optiques d'un tel milieu sont constantes dans toutes les directions sur une longueur d'onde au moins et en pratique sur de bien plus grandes distances. La plupart des matériaux naturels et artificiels sont de tels matériaux : on les dit isotropes. Toutefois, il existe aussi des matériaux naturels dits anisotropes dont la structure microscopique crée des directions privilégiées. C'est le cas des matériaux biréfringents, dont l'indice de réfraction optique n'est pas le même dans toutes les directions.

L'anisotropie des matériaux naturels peut être imitée artificiellement en remplaçant les arrangements atomiques par des arrangements de dispositifs optiques de tailles inférieures à la longueur d'onde. Un métamatériau est donc un matériau dont certaines propriétés, optiques par exemple, ne résultent pas de sa composition chimique élémentaire, mais d'une architecture artificielle *(voir la figure 1)*. Cette dernière lui confère des propriétés, dites effectives, qui dépendent de la direction.

## Invisibilité par réfraction

Aujourd'hui, les physiciens savent de mieux en mieux conférer à un matériau l'anisotropie nécessaire pour donner à une onde électromagnétique ou autre une conformation fixée. John Pendry, de l'*Imperial College* de Londres, David Schurig, de l'Université d'État de Caroline du Sud, et David Smith, alors à l'Université de San Diego, ont indiqué en 2006 la méthode générale pour y parvenir.

Avant d'expliquer l'idée de cette méthode, rappelons que la propagation du champ électromagnétique dans le vide ou dans un matériau transparent est décrite par les équations de Maxwell. Ces équations fondamentales de l'électromagnétisme décrivent de quelle façon se comportent dans le temps et l'espace les composantes indissociables du champ électromagnétique, à savoir le champ électrique et le champ magnétique.

Toutefois, au sein d'un matériau transparent (aux propriétés linéaires), la réaction de la matière aux champs électrique et magnétique modifie ces derniers de façon proportionnelle. Cette réaction est caractérisée par deux grandeurs, la permittivité diélectrique, notée $\epsilon$, pour ce qui est du champ électrique, et la perméabilité magnétique, notée $\mu$, pour ce qui est du champ magnétique. Elles caractérisent la « réponse » du matériau au champ électromagnétique. La stratégie de J. Pendry et de tous les concepteurs de métamatériaux consiste à contrôler les grandeurs $\epsilon$ et $\mu$ dans le volume occupé par le métamatériau et ainsi à modifier à volonté la propagation d'un champ électromagnétique dans la structure.

L'entreprise serait compliquée si J. Pendry n'avait trouvé une méthode mathématique pour la ramener à la recherche d'une transformation géométrique, un changement de métrique pour être plus précis. On désigne par ce terme un changement de la définition de la distance entre deux points, qui en pratique se traduit par un changement des coordonnées spatiales. Les équations de Maxwell gardent la même forme lorsqu'on fait des changements de coordonnées d'espace. En revanche, $\epsilon$ et $\mu$ sont modifiées, ce qui crée des directions privilégiées, donc un milieu anisotrope.

Puisque, dans un tel milieu, ces grandeurs dépendent de la direction, $\epsilon$ et $\mu$ ne sont plus représentées chacune par un seul nombre, mais par un tableau de $3 \times 3$ nombres appelé tenseur. Toutefois, oublions ce détail technique et retenons seulement que, pour décrire l'anisotropie, les physiciens emploient un formalisme qui, au prix d'une complication de la nature mathématique de $\epsilon$ et de $\mu$, leur permet de changer d'espace (et de coordonnées) tout en conservant la forme habituelle des équations de Maxwell, ainsi que la forme des calculs usuels en électromagnétisme.

Pour obtenir un milieu anisotrope structuré à volonté, J. Pendry définit d'abord ce qu'il souhaite : par exemple, une situation où les ondes contournent une certaine région de l'espace. Par changement de métrique, il passe dans un espace virtuel où est réalisé ce qu'il souhaite : par exemple que cette région soit réduite à un point. Il impose que $\epsilon$ et $\mu$ y soient constantes, de sorte que les ondes s'y propagent en ligne droite. Une fois obtenu cet espace virtuel où la permittivité et la perméabilité sont uniformes, le changement inverse


LES AUTEURS

Sébastien GUENNEAU et Stefan ENOCH sont chercheurs du CNRS à l'Institut Fresnel de l'Université d'Aix-Marseille. Ross MCPHEDRAN est professeur à l'Université de Sydney, en Australie.


L'ESSENTIEL

- Les métamatériaux sont des dispositifs conçus pour réfracter les ondes de façon contrôlée.
- Une méthode géométrique générale détermine à partir des trajets recherchés pour les ondes, les propriétés que doit avoir le métamatériau.
- On a ainsi créé des capes d'invisibilité capables d'escamoter une partie de l'espace ainsi que des lentilles qui, en principe, ont une résolution parfaite.
- Ces métamatériaux sont très sensibles à la longueur d'onde et ne fonctionnent que sur un spectre étroit.

Minas H. Tanielian, Boeing Phantom Works

de coordonnées déforme les trajets des ondes, de façon à réaliser la situation souhaitée : par exemple contourner la région à dissimuler. Cependant, ce retour à l'espace réel modifie aussi $\epsilon$ et $\mu$, c'est-à-dire que leurs valeurs varient dans l'espace selon un certain motif. Nous voyons que pour déformer comme on le souhaite les trajectoires des ondes électromagnétiques, il suffit de « sculpter » le matériau selon le motif en $\epsilon$ et $\mu$ indiqué par la transformation géométrique de J. Pendry.

Et cela fonctionne ! En mai 2006, cinq mois après avoir publié leur méthode, J. Pendry et ses collègues ont fabriqué grâce à elle une cape d'invisibilité, où ils ont fait ainsi disparaître de la vue (dans le domaine des micro-ondes) un cylindre plat de cuivre de trois centimètres de rayon.

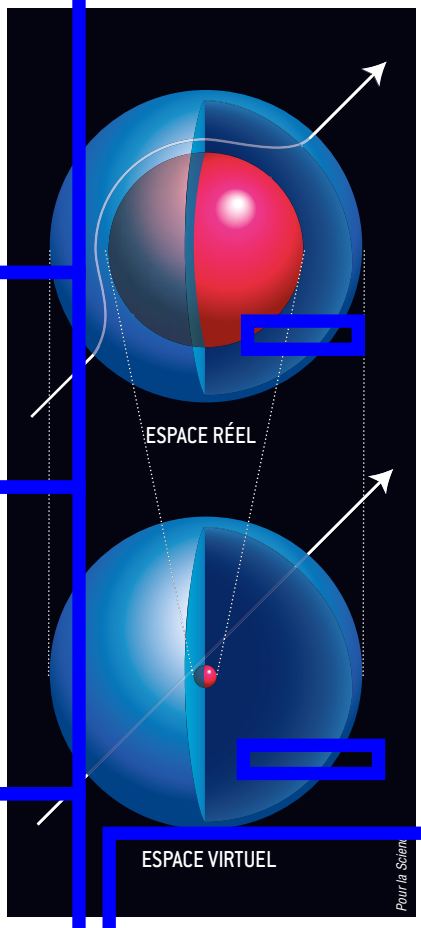
Pour obtenir sa cape d'invisibilité, J. Pendry a choisi une transformation géométrique qui revient à comprimer une boule en une coquille sphérique, délimitée par deux sphères concentriques. Dans l'espace virtuel, le matériau est une boule homogène pointée (c'est-à-dire dont le centre est exclu) ; dans l'espace réel, il correspond à une boule évidée d'un noyau sphérique, où on loge l'objet à cacher *(voir la figure 2)*.

Dans l'espace virtuel, les ondes électromagnétiques traversent la boule en ligne droite sans être perturbées par le point central. Dans l'espace réel, elles contournent le noyau, à la manière de l'eau d'une rivière s'écoulant sans turbulences autour d'un rocher *(voir la figure 3)*. Autrement dit, elles sont insensibles à l'objet placé dans le noyau, qui est comme transparent.

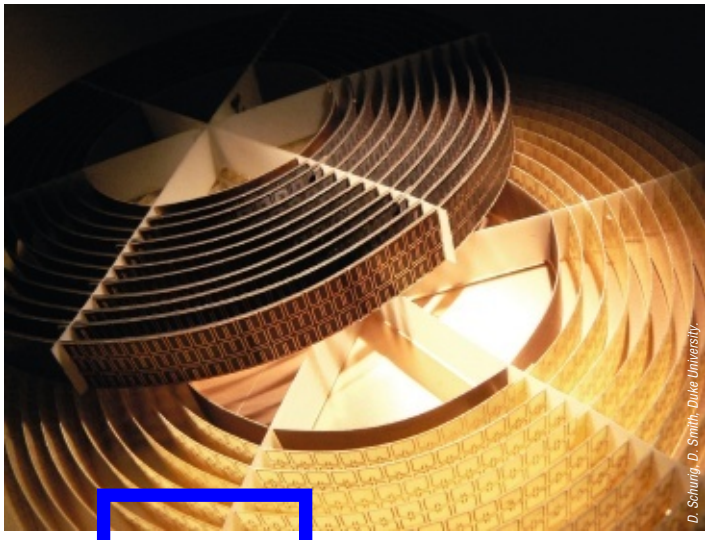
Que se passe-t-il à l'intérieur de la cape ? Un observateur situé dans la région centrale est coupé du monde extérieur. Plongé dans le noir le plus complet, il ignore ce qui se passe en dehors de la cape : il se trouve dans une sorte de trou noir optique. C'est ce que confirment les simulations numériques. Elles montrent aussi que les ondes qui contournent le noyau d'invisibilité se reforment derrière lui avec la même phase que celle qu'elles auraient eue si elles s'étaient propagées dans le vide.

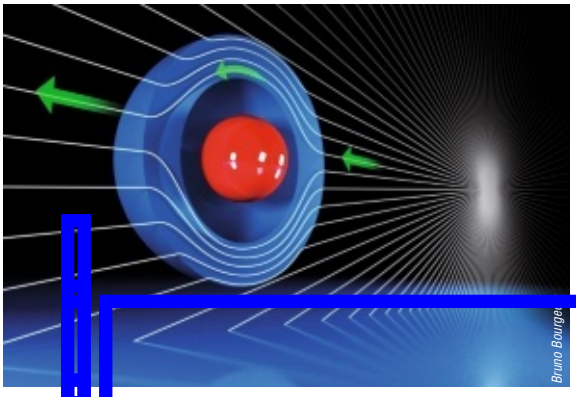
En fait, la cape d'invisibilité de J. Pendry fonctionne seulement à deux dimensions et dans le domaine des micro-ondes. À quoi ressemble-t-elle ? Le cylindre de cuivre qu'elle fait disparaître est entouré d'une structure cylindrique creuse d'apparence hétérogène, dont le rayon extérieur est de six centimètres. Si l'on y regarde de plus près, cet anneau est constitué lui-même de dix cylindres concentriques à la surface desquels sont imprimées des petites boucles en cuivre : des résonateurs en forme d'anneaux fendus. C'est cet ensemble qui constitue le métamatériau et qui forme la cape d'invisibilité. Notons que son emploi suppose aussi celui d'un guide d'ondes afin de repositionner le champ électrique à la verticale.

Peut-on étendre le principe de la cape de J. Pendry au domaine du visible ? Oui, mais il faut en pratique franchir de nombreux obstacles. La sensibilité des métamatériaux à la longueur d'onde gêne la réalisation d'une cape efficace à plus d'une longueur d'onde. Il faudra ensuite passer à trois dimensions. Enfin, la réalisation de résonateurs à anneaux fendus de taille au moins dix fois inférieure à la longueur



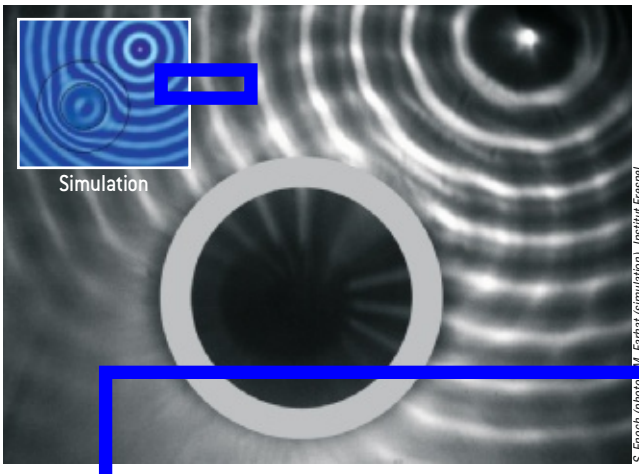

**2. DANS UN ESPACE VIRTUEL,** on considère un volume sphérique dont le centre *(en rouge)* est exclu. Une transformation géométrique lui associe, dans l'espace réel, une coquille sphérique dont les dimensions extérieures sont conservées, mais celles du cœur notablement augmentées. Certaines caractéristiques du milieu, homogènes dans l'espace virtuel, deviennent anisotropes, ce qui a pour conséquence que les ondes électromagnétiques *(flèches blanches)* contournent le cœur de la coquille.



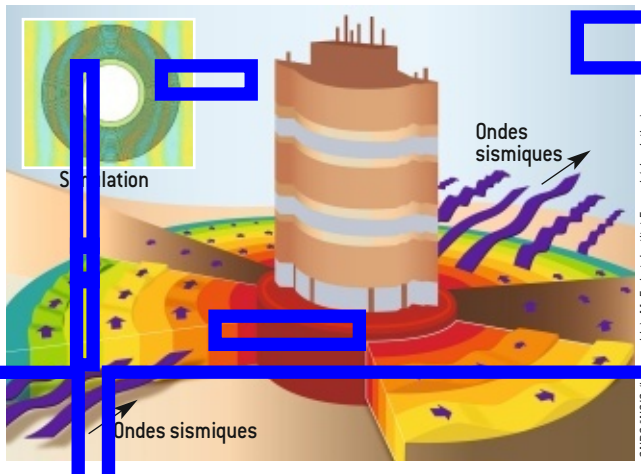




**3. LA CAPE D'INVISIBILITÉ DE J. PENDRY** *(ci-contre à gauche)* détourne les ondes centimétriques ou micro-ondes, comme sur le schéma ci-dessus. Cette propriété résulte de la présence de minicircuits de taille inférieure à la longueur d'onde et de l'architecture en anneaux concentriques.


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




S. Enoch (photo), M. Farhat (simulation), Institut Fresnel




CNRS/INSIS (infographie), M. Farhat, Institut Fresnel (simulation)

**4. CETTE CAPE ANTIVAGUES** *(au premier plan, masquée par un disque car elle brille au flash)* stabilise et aplatit un train incident de vaguelettes *(en haut à droite)*. En mer, de tels dispositifs pourraient protéger des plateformes pétrolières ou des portions de côte.

**5. UNE CHAPE ANTISISMIQUE** est une cape d'invisibilité pour les ondes dites de Rayleigh. Elle est structurée de façon que ces ondes de surface les plus destructrices lors d'un séisme contournent son centre, donc épargnent les fondations du bâtiment.

d'onde visée reste pour l'heure un défi technique : dans le cas du spectre visible, il faudrait des motifs de quelques dizaines de nanomètres seulement…

Malgré ces obstacles, les avancées théoriques et techniques ont été si rapides que certains physiciens prévoient l'élaboration de capes d'invisibilité dans le domaine visible d'ici une dizaine d'années. Aux longueurs d'onde radio, les applications porteraient sur le développement de boucliers ou casques protecteurs électromagnétiques. Des capes d'invisibilité pourraient isoler les appareils sensibles du rayonnement électromagnétique ambiant dans les carlingues des avions ou les hôpitaux. On peut aussi imaginer des casques protecteurs contre les ondes des téléphones portables…

La transposition de ces principes à la réalisation de capes acoustiques, sismiques ou déviant les vagues de la mer est aussi possible. Ainsi, notre équipe marseillaise a récemment réalisé une petite structure déviant les vagues. Elle est constituée d'un disque métallique évidé et de 20 centimètres de diamètre, divisé en secteurs concentriques et radiaux. Nous avons vérifié son efficacité au cours d'une expérience en cuve à ondes, et constaté que la structure rend en effet la surface liquide étale en son centre. Une telle structure, à une échelle bien plus grande bien sûr, pourrait protéger des plateformes pétrolières ou certaines zones côtières contre les tsunamis *(voir la figure 4)*.

Une cape sismique est aussi envisageable. Avec [illegible] de l'Université de Liverpool, au Royaume-Uni, nous avons proposé une solution en nous concentrant sur les plus destructrices des ondes associées aux tremblements de terre : les ondes de Rayleigh, qui sont un type particulier d'onde de flexion (le sol fléchit en surface). Ces recherches ont produit une chape, qui, placée dans les fondations d'un immeuble, le protégerait en grande partie des effets d'un séisme *(voir la figure 5)*. Les ondes de flexion contourneraient le centre de la chape et continueraient leur chemin sans traverser le bâtiment à protéger.

## Lentille parfaite

Grâce au principe mis au point par J. Pendry et ses collègues, la réalisation d'une lentille parfaite est aussi envisageable. On nomme ainsi une lentille qui ne déforme pas l'image, ne l'inverse pas et qui a une résolution infinie (l'image d'un point est strictement un point). Les lentilles convergentes convexes usuelles, d'indice de réfraction supérieur à celui du vide ($n = 1$), forment sur le plan image une image inversée, et où deux points distants de moins d'une demi-longueur d'onde environ ne peuvent être distingués. Cette limite ultime de résolution est due à la diffraction de la lumière incidente sur l'objet imagé. On la croyait infranchissable avant l'avènement de la lentille parfaite.

La lentille parfaite théorique consiste en une couche parfaitement plate d'indice de réfraction négatif. Rappelons que l'indice optique ou l'indice de réfraction d'un matériau est le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans le matériau : $n = c/v$. Toutefois, la vitesse $v$ de propagation de la lumière dans un milieu est intimement liée à la perméabilité magnétique $\mu$ et à la permittivité électrique $\epsilon$ par la relation $\mu\epsilon v^2 = 1$, ou, ce qui revient au même, $n = \pm c\sqrt{\mu\epsilon}$.

Sauf rares exceptions, les milieux optiques naturels ont tous une perméabilité et une permittivité positives, et en conséquence un indice de réfraction $n$ positif et supérieur à 1. Toutefois, vers 1968, le physicien russe Victor Veselago s'est intéressé aux cas des matériaux ayant une perméabilité et une permittivité négatives. Il a montré que les lois de l'optique impliquent que les matériaux correspondants – qui sont, en pratique, des métamatériaux – ont un indice négatif (c'est-à-dire $n = -\sqrt{\mu\epsilon}$). L'étude de la réfraction négative était née, et avec elle celle de la « lentille plate de Veselago » : une simple lame d'indice négatif égal à –1.

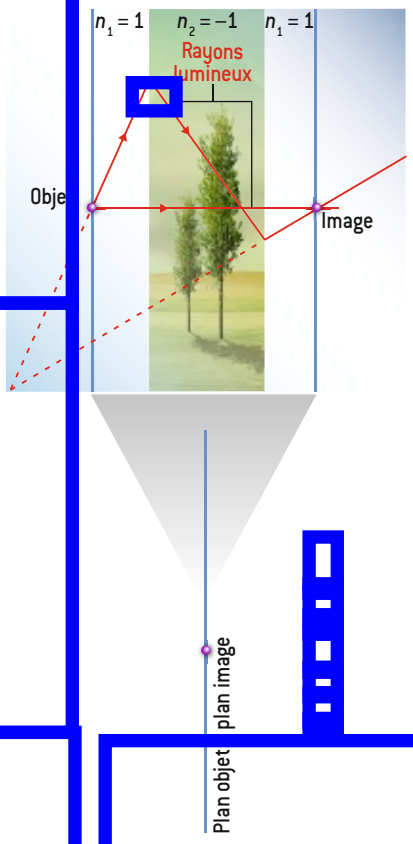
C'est une fois de plus J. Pendry qui, en 2000, en proposa la réalisation. Il avait en effet montré qu'une alternance périodique de fils métalliques et de résonateurs à anneaux fendus présentait une permittivité négative pour les basses fréquences et une perméabilité négative autour de certaines fréquences dites de résonance. Il réalisait ainsi en pratique, mais pour certaines fréquences seulement, le milieu optique imaginé par V. Veselago.

Là encore, la méthode géométrique générale expliquée plus haut [illegible] se représenter facilement les effets de la

lentille de V. Veselago. Le changement de coordonnées choisi fait passer de l'espace réel à un espace virtuel où la tranche occupée par la lentille plate est réduite à un plan : c'est une sorte de repliement de l'espace sur lui-même qui a été opéré lors du passage dans l'espace virtuel, dont la conséquence dans l'espace réel est que $\mu$ et $\epsilon$ sont négatives, ainsi que $n$. Notons qu'ici $\mu$ et $\epsilon$ restent de simples nombres sous l'effet de cette transformation géométrique qui n'introduit pas de direction privilégiée, donc d'anisotropie.

L'effet optique de ce repliement d'espace est de confondre le plan objet et le plan image *(voir la figure 6)*, ce qui explique qu'il n'y ait pas d'inversion d'image et que la résolution soit infinie. En effet, dans l'espace virtuel, tout point objet étant son propre point image, il en résulte dans l'espace réel que tout point est transformé en un point et uniquement en ce point. Notons par ailleurs que la lentille parfaite de V. Veselago est aussi une sorte de cape d'invisibilité, puisque tout ce qui se trouve dans l'épaisseur de la lentille est invisible.

De concept théorique, la lentille de V. Veselago était donc devenue une curiosité de laboratoire ne fonctionnant qu'à partir des résonateurs de J. Pendry et pour une longueur d'onde fixe… Pourtant, depuis la proposition de J. Pendry, plusieurs équipes ont mis au point des prototypes de lentilles parfaites dans le domaine des ondes centimétriques. La principale difficulté pour descendre dans le domaine du visible est que les métaux, pierre angulaire des métamatériaux, sont fortement absorbants aux longueurs d'onde optiques, ce qui limite la résolution de la lentille parfaite de J. Pendry.

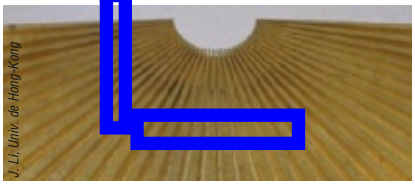



**6. LA LENTILLE PARFAITE** consiste en une lame d'indice optique égal à –1. La réfraction atypique qui en résulte fait que l'image d'un point objet est le point symétrique par rapport au plan médian de la lentille *(en haut)*. Tout se passe comme si la lumière continuait son chemin en ligne droite en l'absence de lentille, c'est-à-dire comme si l'espace occupé par la lentille avait été réduit à un plan par le changement de métrique *(en bas)*. Initialement théorique, ce concept connaît aujourd'hui plusieurs réalisations à partir de métamatériaux.

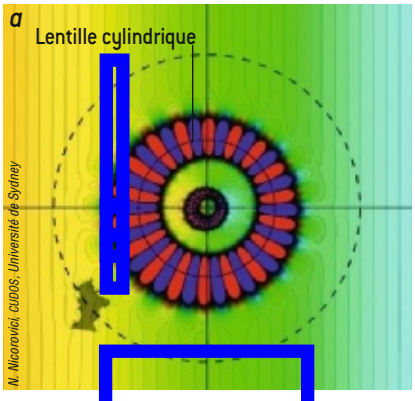
## Course à la réalisation de lentilles parfaites

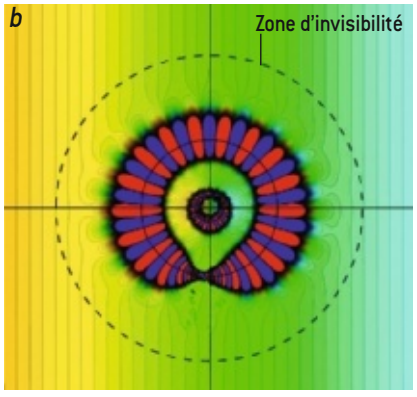
Toutefois, en 2005, l'équipe de Xiang Zhang à l'Université de Los Angeles a démontré expérimentalement une résolution supérieure à un cinquième de longueur d'onde à travers un métamatériau constitué d'un mince film d'argent pris en sandwich entre deux couches de semi-conducteur, pour une fréquence du domaine visible. Depuis lors, une course effrénée à la réalisation de lentilles parfaites s'est engagée, avec des résolutions atteignant aujourd'hui un vingtième de longueur d'onde dans le proche infrarouge.

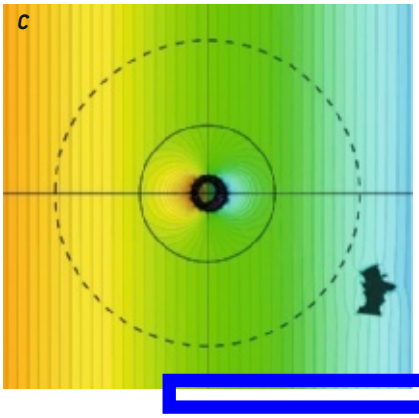
Outre la lentille plate de V. Veselago, Nicolae Nicorovici, de l'Université de Sydney, Graeme Milton, de celle d'Utah, et l'un d'entre nous (R. McPhedran) ont proposé en 2005 un principe de lentille cylindrique produisant un nouvel effet d'invisibilité. Cette équipe a étudié le comportement insolite d'une excitation lumineuse au voisinage d'un cylindre de permittivité négative (mais pas obligatoirement d'indice négatif). Elle a montré que ce dispositif se comporte comme une lentille parfaite dont le grossissement




**7. CETTE LENTILLE CYLINDRIQUE MÉTALLIQUE** *(à gauche, une moitié vue de l'intérieur)* fonctionne par réaction, c'est-à-dire que les dipôles atomiques dont elle est formée réagissent à la présence des dipôles de l'objet d'une façon qui le rend invisible dans une certaine zone. La simulation numérique *(ci-dessous)* montre les champs électriques *(lobes rouges et bleus)* induits par cette réaction dans trois situations : quand l'objet *(ici, une figurine)* s'approche de la zone d'invisibilité *(cercle en pointillés, a)*, quand elle y est *(b)* et quand elle en sort *(c)*. On voit que le champ n'est pas perturbé en dehors de la zone d'invisibilité.

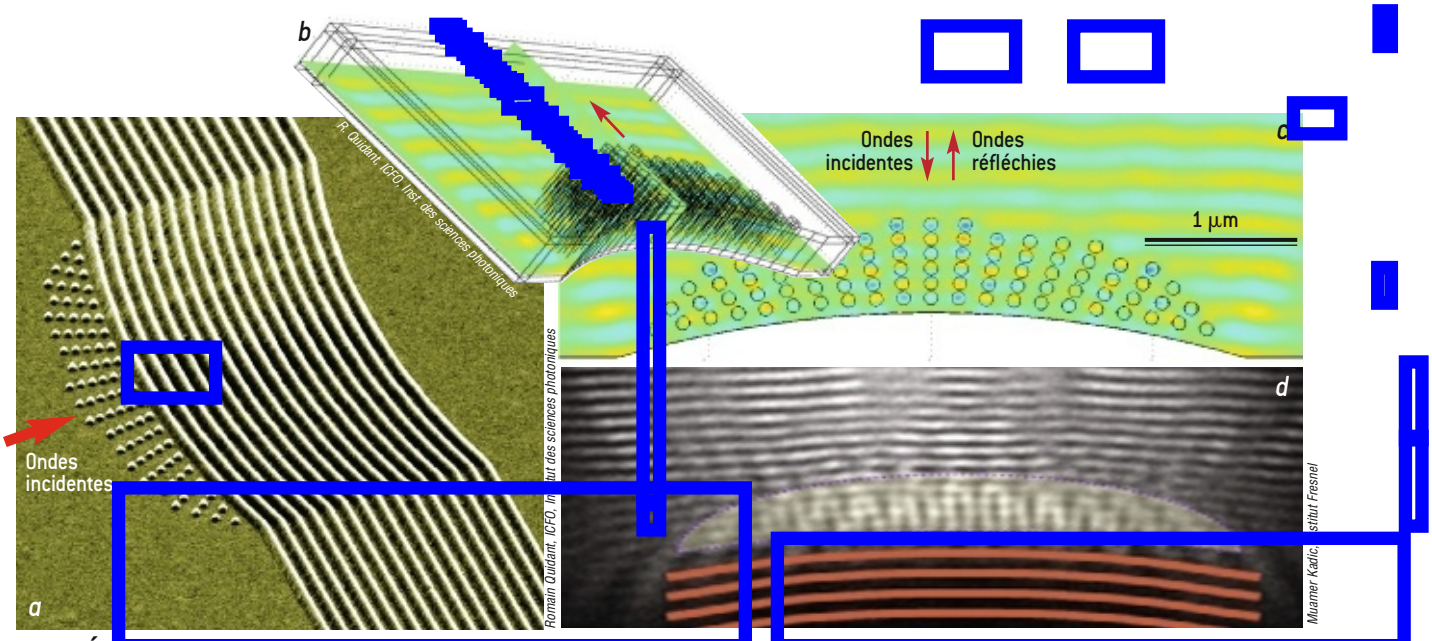





© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




**8. UN RÉSEAU PLASMONIQUE** constitué de points gravés sur une surface métallique *(a)* fournit un autre exemple d'invisibilité par réaction. L'arrivée d'ondes électromagnétiques *(flèche rouge)* crée des ondes électroniques de surface nommées plasmons. Comme le montrent la simulation numérique *(b et c)* et les mesures *(d)*, ces plasmons absorbent l'onde incidente et, grâce aux stries gravées à l'arrière qui font office de miroir, la restituent intacte – malgré la courbure du miroir qui, en l'absence du réseau plasmonique, l'aurait déformée.

est dû à sa courbure : comme avec une lentille convexe, une image virtuelle agrandie est créée en avant de la lentille. Et elle a montré que le dispositif fonctionne aussi comme une cape d'invisibilité : sous certaines conditions (pour certaines longueurs d'onde), il réagit à la présence des champs magnétiques et des dipôles électriques atomiques d'un objet et efface ainsi le champ électromagnétique associé à ce dernier *(voir la figure 7)*. Le principe fonctionne aussi avec tout grand ensemble de dipôles atomiques, mais à une longueur d'onde précise et pour une cape homogène de permittivité négative ou d'indice de réfraction égal à –1.

## Invisibilité par réaction

Pour comprendre cette forme d'invisibilité, on peut là encore utiliser la méthode géométrique de J. Pendry. Comme ce dernier l'a fait remarquer, considérer un indice négatif revient à replier une portion de l'espace pour la faire disparaître. Dans le cas présent, le repliement se fait vers l'extérieur, de sorte que le dipôle électrique ou la myriade de dipôles atomiques dont est formé un objet disparaissent non pas derrière cette cape d'invisibilité, mais devant… Le dispositif n'a pas encore été réalisé, mais il pourrait en principe rendre presque invisible tout objet dont la réponse électromagnétique serait analogue à celle d'un ensemble de dipôles. Sa réalisation, qui demande un indice de réfraction proche de –1, reste pour le moment un défi technique.

Quels types d'invisibilité avons-nous présentés à ce stade ? La cape d'invisibilité de J. Pendry et la lentille de V. Veselago sont deux cas d'invisibilité par réfraction. La première a pour effet de créer un indice de réfraction anisotrope positif (produit de la permittivité et de la perméabilité, qui sont ici deux ensembles de neuf nombres positifs) et la seconde un indice de réfraction isotrope négatif. Quant à la lentille parfaite cylindrique, supposée être caractérisée par un indice de réfraction proche de –1, elle crée une invisibilité par réaction. Ce type d'invisibilité par réaction peut aussi être réalisé par des structures en échiquier dont les cases alternent des indices positifs et négatifs : la réaction consiste alors en la création de plasmons (des ondes électroniques de surface) qui vont absorber l'onde électromagnétique incidente, puis la restituer en arrière du dispositif, les cases d'indice négatif permettant un repliement de l'espace sur lui-même.

Nous voyons que les types d'invisibilité tendent à se multiplier et s'étendent à tous les types d'ondes. D'une manière générale, c'est l'art de la conformation à volonté du champ électromagnétique qui ne cesse de s'enrichir d'année en année. Il se fonde sur l'invariance de forme des équations fondamentales de la physique, et définit un nouveau modèle en physique des ondes : celui de la physique transformationnelle. ■

## BIBLIOGRAPHIE


A. Nicolet, **Les capes d'invisibilité et l'optique transformationnelle**, *Images de la Physique 2010*, CNRS, 2010.

S. Guenneau *et al.*, **Negative refraction in a checkerboard by mirror anti-symmetry and 3-D corner lenses**, *New Journal of Physics*, vol. 7, p. 164, 2005.

F. Zolla *et al.*, **Electromagnetic analysis of cylindrical invisibility cloaks and the mirage effect**, *Optics Letters*, vol. 32, pp. 1069-1071, 2007.

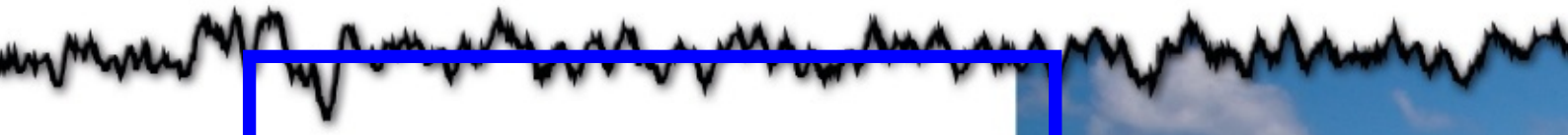
J. Pendry *et al.*, **Controlling electromagnetic fields**, *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782, 2006.

Ulf Leonhardt et Thomas Philbin, **Geometry and Light : The Science of Invisibility**, Dover publication, 2010.

A. Alu et N. Engheta, **Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings**, *Physical Review E*, vol. 72, 016623, 2005.

Michel Campillo

# Ce bruit sismique qui sonde la Terre



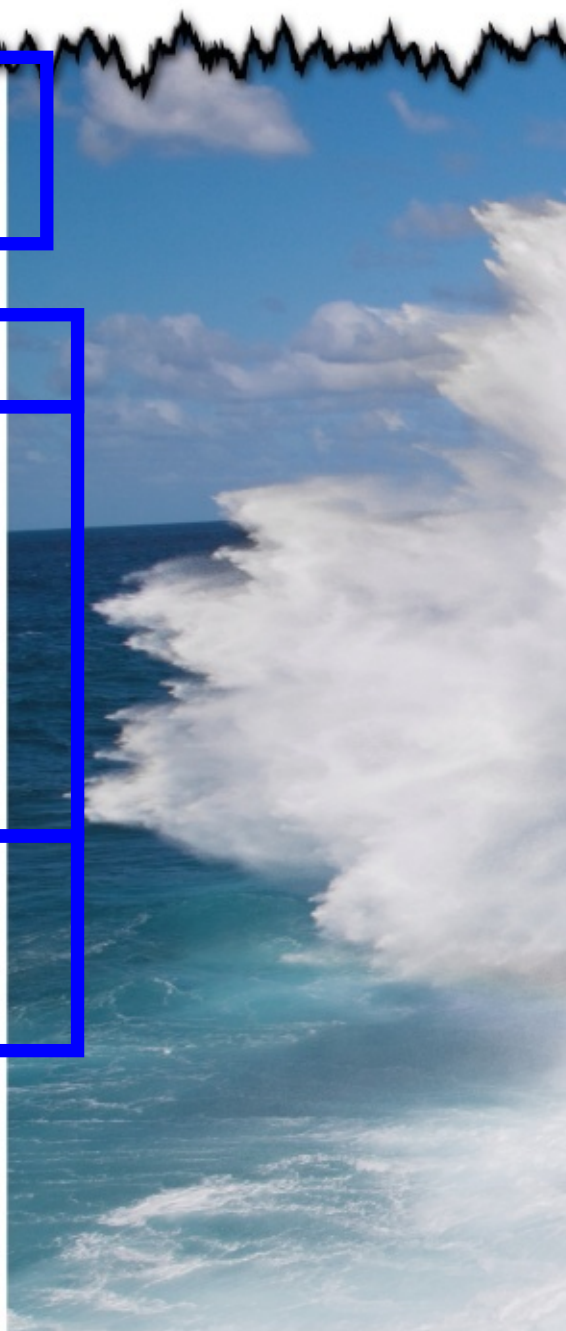
**L'analyse mathématique du simple bruit sismique améliore la cartographie des structures géologiques souterraines et permet, pour la première fois, d'étudier l'évolution de ces structures au cours du temps.**

Une lumière éclaire l'intérieur de la Terre : les ondes sismiques. Les sismologues savent mettre en images la structure du monde souterrain à partir de ces vibrations qui se propagent dans les profondeurs du sol. Ils exploitent pour cela les ondes émises par les tremblements de terre ou des sources artificielles comme des explosions. Toutefois, cette imagerie sismique active ne se pratique que dans certaines zones, ou seulement à petite échelle et à certains moments.

C'est pourquoi les géophysiciens cherchent à utiliser aussi le « bruit » sismique qui agite faiblement, mais sans cesse, l'intérieur de la Terre. Il provient pour l'essentiel des microséismes dus aux interactions des mers avec la croûte terrestre (*voir la figure 1*). Judicieusement exploités, les enregistrements assez longs de ce bruit révèlent la structure souterraine. Après avoir expliqué comment, nous présentons quelques-uns des premières applications géologiques de cette méthode, notamment la recherche de signes avant-coureurs des séismes et des éruptions.

Les ondes sismiques sont un cas particulier d'ondes élastiques au sein des solides (*voir la figure 2*). Il en existe deux principaux types : les ondes P qui sont des ondes de compression, et les ondes S qui sont des ondes de cisaillement (la vibration est transversale à la propagation). Ces ondes dites de volume se combinent pour donner en surface des ondes, qui peuvent être soit des ondes de Love ou L (des ondes S guidées dans les couches superficielles) ou des ondes de Rayleigh ou R (dont les caractéristiques évoquent celles des vagues sur la mer).

Les ondes sismiques ont d'abord été utilisées pour faire de l'imagerie sismique active. Comparables à celles de l'imagerie médicale, les méthodes pour ce faire se fondent sur la mesure des temps de parcours d'ondes dans le terrain étudié. Ainsi, on parle de tomographie sis-



mique lorsqu'on utilise des ondes ayant traversé un volume souterrain pour reconstruire et cartographier les zones de propagation à forte ou à faible vitesse.

## L'imagerie active a ses limites

Pour sa part, la « sismique réflexion » est le pendant de l'échographie : on y exploite les échos dus aux interfaces des couches géologiques pour reconstruire précisément leurs formes. On doit à ces méthodes la découverte de la structure de la Terre en couches concentriques, puis celle des variations latérales de vitesses de propagation au sein de ces couches, qui trahissent les mouvements de convection à l'origine de la tectonique des plaques.

À plus petite échelle, les ondes sismiques sont aussi au service de la prospection d'hydrocarbures. La mise en évidence de lits de rivières ayant coulé il y a plusieurs dizaines de millions d'années, ou encore celle de cratères d'impacts enterrés sous plusieurs kilomètres de sédiments marins, est un spectaculaire sous-produit de la sismique réflexion pétrolière. Ces prouesses ne sont pas sans prix ni peines : il faut mettre en œuvre des centaines, voire des milliers, de sources et de capteurs. Seuls des objectifs économiques rendent possibles pareilles explorations, et tant leurs résultats que leurs retombées se limitent donc à des cibles particulières. Il est en outre difficile de les répéter, de sorte qu'elles ne permettent d'étudier l'évolution du sous-sol dans le temps qu'à grands coûts.

À ces limitations pratiques de l'imagerie sismique active s'ajoutent celles qui pèsent sur le recueil des données associées aux séismes. Les mesures utiles à l'étude de la structure profonde de la planète sont les enregistrements des séismes de magnitude 5 ou plus. La compilation des temps d'arrivée des ondes a produit des modèles moyens des régions géologiques du globe, qui ont ensuite été précisés. Ce travail de précision a été rendu possible par le développement des réseaux de stations sismologiques, mais souffre de limites infranchissables : rareté des mesures sur l'océan, qui couvre pourtant la plus grande partie du globe, limitations imposées sur le déroulement du travail à terre par les guerres et les conflits intérieurs, etc.

**1. LES CHOCS DES VAGUES** sur la côte ou le plateau océanique sont à l'origine d'un bruit sismique permanent. À cela s'ajoute le bruit engendré par les affrontements de trains de houle océanique qui, en mettant toute la colonne d'eau en vibration, font aussi trembler le fond.

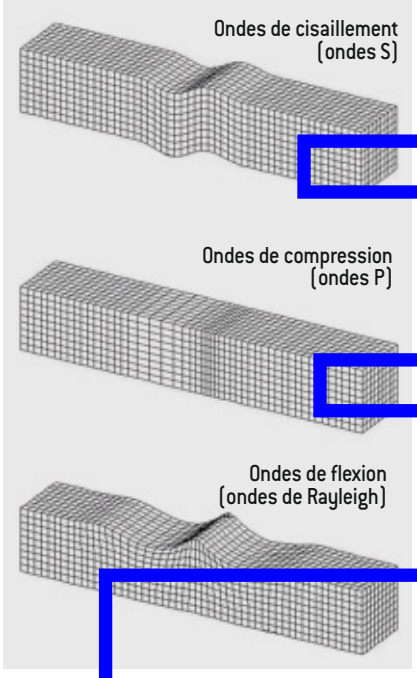
© ShutterstockSasiwai

### L'ESSENTIEL

- ✔ **Les océans émettent sans cesse des signaux sismiques non seulement près des continents, mais aussi en profondeur.**
- ✔ **Comparable à une lueur qui éclaire l'intérieur de la Terre, ce bruit sismique peut être traduit en images des structures géologiques n'importe où sur le globe.**
- ✔ **Pour la première fois, il devient aussi possible de suivre dans le temps les phénomènes géologiques, voire de les prévoir.**

L'AUTEUR

Michel CAMPILLO, sismologue, est professeur à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, où il effectue ses recherches à l'Institut des sciences de la Terre. Il est aussi membre de l'Institut universitaire de France.




**2. LES ONDES SISMIQUES** apparaissent sous quatre formes. Les ondes S et les ondes P, qui se propagent en profondeur, se combinent pour former en surface des ondes de flexion nommées ondes de Rayleigh et des ondes de cisaillement, les ondes de Love. Pour faire de l'imagerie, les sismologues enregistrent les ondes S, les ondes P et les ondes de Rayleigh.

Ces limites liées à l'homme pourront sans doute être dépassées un jour, mais il existe un obstacle géologique infranchissable : les séismes ne sont pas répartis partout, mais sont concentrés sur quelques grandes failles et dans les zones de subduction, des régions où des plaques océaniques plongent dans le manteau. Et disposer des sources artificielles d'énergies comparables à celles de séismes n'est pas envisageable, car il faudrait déclencher des explosions thermonucléaires pour atteindre des énergies nécessaires…

Les limites de l'imagerie sismique active poussent les sismologues à rechercher une autre façon d'obtenir les temps de parcours des ondes sismiques au sein des terrains géologiques : c'est pour cette raison qu'est née l'imagerie sismique passive. De quoi s'agit-il ?

## Mesurer la corrélation entre deux points

À la base des méthodes d'imagerie sismique passive se trouve l'idée que les vibrations observées en deux points distants ne sont pas indépendantes. Au sein de la Terre, tout phénomène à l'origine d'ondes élastiques émet de l'énergie vibratoire dans toutes les directions. Ainsi, de même que l'on parvient à détecter les vibrations du sol lorsqu'un séisme se produit à des milliers de kilomètres, une petite vibration produit des microséismes de la Terre. Mesurés en deux points différents, ces signaux seront décalés temporellement, mais liés au même événement.

En calculant une certaine fonction $C(\tau)$ de leur décalage temporel $\tau$, on peut faire apparaître ce lien. Cette fonction – la fonction de corrélation – est définie comme la moyenne temporelle du produit des deux signaux, l'un pris en un instant $t$ et l'autre en cet instant décalé de $\tau$, c'est-à-dire pris à l'instant $t - \tau$ *(voir l'encadré page 67)*. En l'absence de lien entre deux signaux et un même événement, la fonction de corrélation est nulle ; en présence d'un lien, elle sera non nulle pour tous les décalages $\tau$ pour lesquels ce lien existe. C'est cette corrélation entre les signaux provenant d'une même source – même microscopique – que l'on exploite en imagerie sismique passive, méthode qui fait introduite en héliosismologie et en acoustique ultrasonore.

Comment ? Pour le saisir, le mieux est de se pencher sur un théorème démontré par Yves Colin de Verdière pour expliquer le succès de la méthode. Ce mathématicien de l'Université de Grenoble s'est intéressé à la fonction de corrélation des signaux parvenus en deux points A et B depuis une infinité de sources sismiques aléatoires réparties de façon homogène au sein d'un solide élastique de géométrie quelconque. Il a montré que la fonction de corrélation est égale au signal reçu directement en B si une seule source ponctuelle se trouve en A. Un résultat étonnant, qui explique la généralité de la méthode de corrélation de bruit.

*A priori*, ce théorème semble peu utile, car il faudrait avoir dans la Terre une infinité de microsources sismiques. Pourtant, nous allons voir qu'il s'applique approximativement. Avec Nicolas Shapiro, aujourd'hui à l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons démontré en 2005 que des signaux enregistrés par des capteurs séparés de plusieurs milliers de kilomètres sont corrélés. Cela nous a permis de mesurer le temps que durerait le trajet d'une onde sismique émise en l'une des stations. À partir de là, il devenait clair que le résultat purement mathématique de Y. Colin de Verdière peut s'appliquer même si ses prérequis ne sont pas parfaitement réalisés. Examinons pourquoi.

La Terre n'est certes pas remplie uniformément de microsources sismiques s'activant aléatoirement. Pour autant, si l'on considère la gamme des périodes vibratoires allant de 5 à 50 secondes, que les sismologues qualifient de microsismiques, on peut se rapprocher de la situation imaginée par Y. Colin de Verdière. Comme tous les bruits, le bruit microsismique est un signal constitué d'un mélange incohérent d'ondes sismiques de longueurs d'onde différentes.

Aux hautes fréquences, de nombreuses sources produisent du bruit. C'est particulièrement le cas des activités humaines, mais elles ont un caractère très local. Deux sources régulières de bruit microsismique existent toutefois, toutes les deux ressenties à grande distance et toutes les deux d'origine maritime.

Depuis plus d'un siècle, en effet, les sismologues se sont aperçus qu'ils enregistraient les impacts successifs de la houle sur le plateau continental et les côtes. Particulièrement fort durant les tempêtes, le bruit ainsi émis dans le sol est caractérisé par une période d'environ 15 secondes. Outre ce phénomène, il arrive que des trains de houle produits dans des régions



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

différentes se rencontrent en mer. Leurs interactions produisent une agitation de forme indistincte, mais qui se caractérise par une fréquence double, donc une période de l'ordre de sept à huit secondes. Ce clapot a pour effet de mettre en vibration toute la colonne d'eau au-dessus de laquelle il se produit. En fonction de la hauteur de celle-ci, il arrive fréquemment que s'installe en outre un phénomène de résonance, qui transforme la colonne d'eau en une sorte de « trompette sismique » émettant dans le sol marin un bruit océanique caractéristique.

On dispose ainsi de sources sismiques susceptibles d'apparaître aléatoirement sur la plus grande partie de la planète (les océans). Pour autant, les tempêtes ou les affrontements de houles ne sont pas assez fréquents pour couvrir complètement et efficacement la Terre. Heureusement, notre planète multiplie l'efficacité de ces sources microsismiques grâce aux propriétés diffusives de sa structure interne.

La Terre, et surtout sa croûte, est loin d'être homogène. Comme le suggère l'observation en montagne de grandes tranches de terrain, elle est faite de mélanges plus ou moins fins de roches et de sédiments, souvent disposés en couches disloquées par des failles, plissées et décalées, traversées de cheminées volcaniques, etc. Bref, la croûte est très hétérogène. Toutes ces sous-structures diffractent les ondes élastiques et leur font parcourir des chemins si longs et si complexes *(voir la figure 3)* qu'une partie du champ d'onde devient diffus.

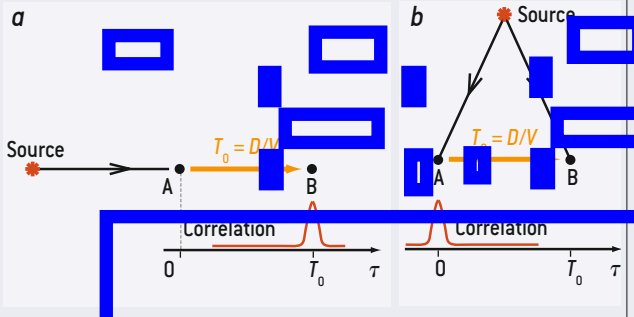
Ce caractère diffusif du sous-sol est un atout pour la méthode des corrélations, puisqu'il crée l'équivalent d'une multitude de sources sismiques secondaires aléatoires (émettant erratiquement) et réparties de façon grossièrement homogène. Ainsi, même si les conditions du théorème de Y. Colin de Verdière ne sont pas parfaitement réalisées, l'expérience montre que les résultats obtenus en l'appliquant quand même sont bons. C'est ce que nous avons montré dès 2001 : en utilisant la partie tardive des sismogrammes (ce que l'on

## L'EXPLOITATION DU BRUIT SISMIQUE PAR CORRÉLATION

L'exploitation du bruit sismique repose sur la corrélation des signaux vibratoires. La corrélation entre $u$ et $v$ dépend d'une variable $\tau$ (interprétée comme le décalage temporel entre les deux signaux) et est définie par la moyenne temporelle du produit $u(t)v(t-\tau)$ :

$$C_{u,v}(\tau) = \lim_{T\to+\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} u(t)\,v(t-\tau)\,dt$$

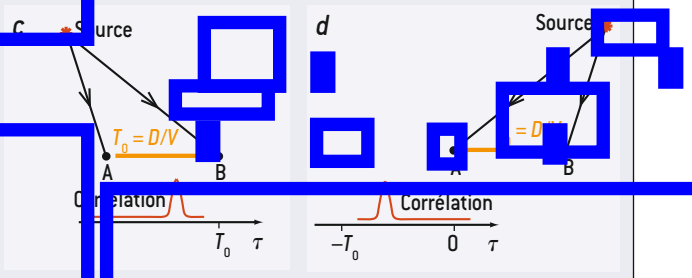
Afin de saisir la signification de cette fonction, traçons-la *(en orange)* dans quelques cas. On convient ici que l'origine $\tau = 0$ de l'axe des $\tau$ est l'instant d'arrivée du signal en A et qu'elle sera donc placée sous ce point, tandis que la valeur de $\tau$ correspondant au temps de propagation de A à B, qui vaut $T_0 = D/V$ ($D$ étant la distance AB et $V$ la vitesse des ondes, ici constante), sera placée sous B. Commençons par le cas *(a)* où une unique source émettant pendant un temps infini mais supérieur à $T_0$ se trouve dans l'alignement de A et B, puis par le cas *(b)* où la source est sur leur médiane.



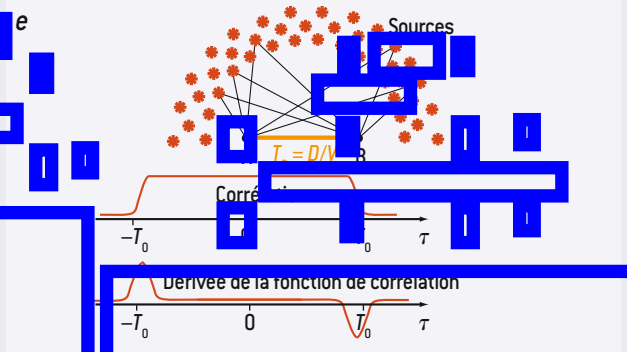

Dans le premier cas *(a)*, la corrélation entre les deux signaux est centrée sur le décalage $\tau$ égal à $T_0$, ce décalage étant le temps nécessaire pour que les signaux aillent de A à B. Dans le second cas, l'arrivée des signaux est simultanée en A et B, de sorte que la corrélation est centrée sur $\tau = 0$.

Considérons maintenant les cas plus généraux où la source se trouve à gauche de A ou à droite de B. Dans le premier cas *(c)*, la corrélation est centrée sur un instant compris entre 0 et $T_0$, car le signal, une fois parvenu en A, n'est pas encore arrivé en B, point qu'il atteindra en un temps inférieur à $T_0$. À l'inverse, dans le cas *(d)*, le signal atteint B avant d'avoir atteint A, donc pour un $\tau$ négatif supérieur à $-T_0$.

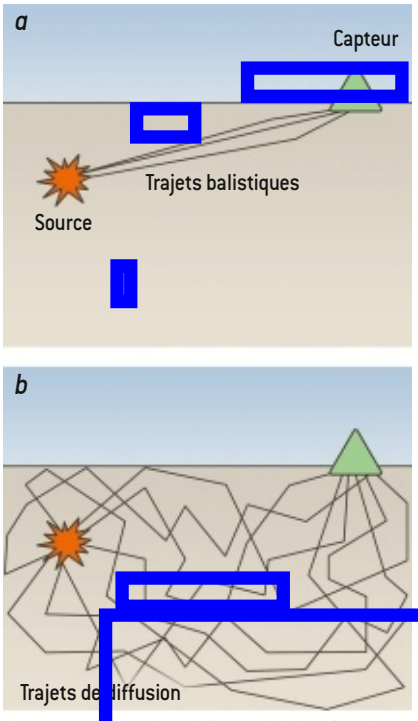
À partir de ces cas particuliers, on peut comprendre que si l'on a une infinité de sources distribuées de façon uniforme *(e)*, chacune va




contribuer à la fonction de corrélation selon les schémas indiqués, ce qui, au total, construit une fonction qui présente un plateau entre les valeurs $-T_0$ et $T_0$ de $\tau$. En dérivant cette fonction de corrélation, on obtient alors une fonction qui a deux pics : l'un en $-T_0$, l'autre en $T_0$. Cela détermine $T_0$ et, connaissant la distance AB, on en déduit aisément la vitesse de propagation entre A et B, qui est bien la grandeur que l'on veut mesurer dans une expérience de sismique active.




C'est le sismologue grenoblois Philippe Roux qui a montré que dans ce cas simple (répartition uniforme des sources, vitesse constante), la fonction de corrélation donne exactement le résultat que l'on mesurerait en A et B si une source ponctuelle se trouvait en A. Pour sa part, Yves Colin de Verdière a généralisé à des milieux complexes quelconques ce résultat simple. Son théorème explique pourquoi la méthode d'expériences de sismique active (séisme en A, mesuré en B), que l'on réalisera virtuellement en autant de points A et B que l'on voudra, placés aux endroits souhaités.




**3. LE PARCOURS DES ONDES SISMIQUES** est très variable. La plus grande partie de l'énergie d'un séisme se propage par la trajectoire balistique (la plus courte) de la source jusqu'à une station de mesure *(a)*. Mais une fraction du signal est diffusée de très nombreuses fois par les interfaces et autres discontinuités de la densité à l'intérieur de la Terre *(b)*. En pratique, chaque centre de diffusion joue le même rôle qu'une source secondaire émettant de l'énergie, faiblement et de façon aléatoire, directement vers la station sismique.

nomme la coda), ma collègue Anne Paul et moi avons pour la première fois reconstruit par corrélation le signal d'une expérience de sismique active entre deux stations.

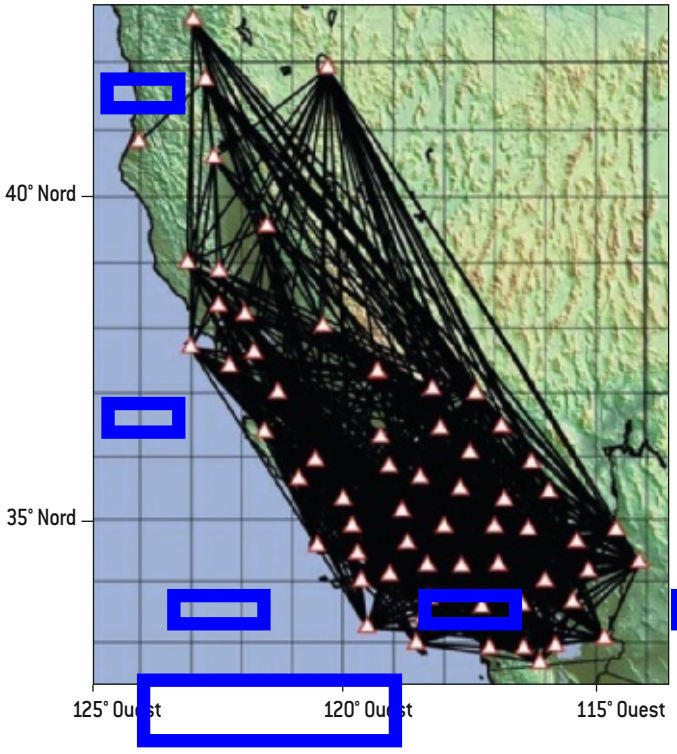
Pour récapituler, la méthode de corrélation permet d'extraire du bruit sismique, avec une bonne approximation, les sismogrammes qui seraient mesurés en des points choisis si l'on déclenchait à volonté des séismes en une série d'autres points.

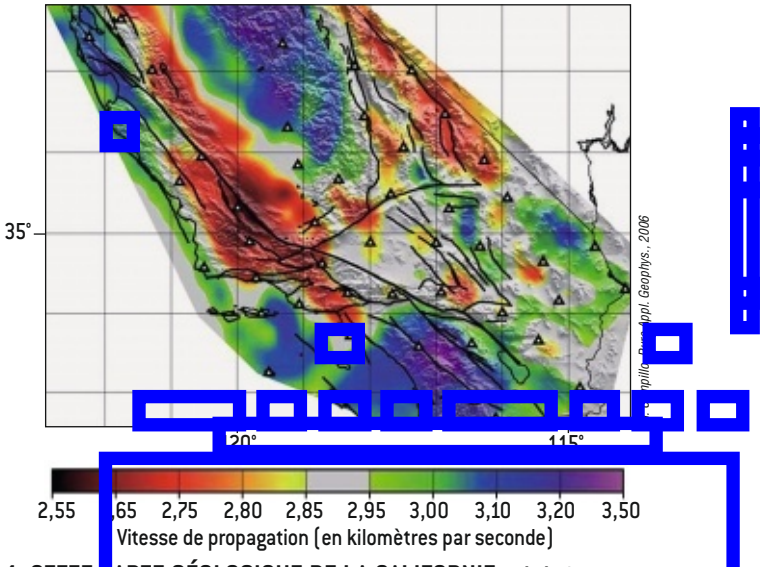
## Une méthode puissante et répétable

Chose remarquable, on voit qu'en imagerie sismique passive, la géométrie du dispositif (l'emplacement des sources fictives et des stations de mesure) est maîtrisable à volonté. L'exploitation du bruit sismique offre donc la possibilité de mener des expériences sismiques directes entre des paires de points choisis comme on le souhaite, ce qui rend possible l'étude de régions où les séismes sont très rares. Pour appliquer la méthode, on exploite les signaux recueillis par des stations sismologiques sur une durée assez longue pour accumuler les effets des tempêtes et autres effets de houle sur tout le globe, soit typiquement pendant plusieurs mois. Cela finit par représenter d'énormes masses de données. Le développement de l'imagerie sismique passive doit donc beaucoup aux nouvelles possibilités de stockage de données et de calculs apparues au cours des années 1990. Lorsque nous avons voulu appliquer la méthode de corrélation pour la première fois, les masses de données que nous avons demandées à nos collègues américains du centre de données IRIS étaient si énormes qu'ils en furent surpris. Le résultat obtenu les rassura sur l'utilité de leurs efforts…

Une fois obtenus à partir des corrélations du bruit sismique, les signaux associés à des paires de points peuvent être exploités par les méthodes habituelles de façon à produire la carte des vitesses de propagation, dont on déduit la carte géologique. Dans la plupart des cas, ce sont les ondes de Rayleigh *(voir la figure 2)* que l'on exploite. Ces ondes se propagent en surface et sont évanescentes en profondeur, c'est-à-dire que leur intensité décroît exponentiellement à partir de la surface. Toutefois, à chaque longueur d'onde correspond une profondeur caractéristique de pénétration (typiquement le tiers de la longueur d'onde) où l'intensité de l'onde est divisée par deux. Par exemple, les ondes de Rayleigh d'une vitesse de l'ordre de trois kilomètres par seconde et ayant une période de 20 secondes pénètrent sur une vingtaine de kilomètres. Elles portent donc l'information sur les propriétés des couches jusqu'à cette profondeur.

En accumulant les résultats pour toute une série de périodes, on explore ainsi les




**4. CETTE CARTE GÉOLOGIQUE DE LA CALIFORNIE** a été obtenue en exploitant le bruit sismique. À gauche, les 1 891 trajets balistiques reliant les 82 stations sismiques californiennes utilisées. À droite, la carte des vitesses de propagation dans la région. Établie deux fois à un mois d'intervalle, cette carte a révélé à quel rythme les tensions provoquées *(en rouge)* par un grand séisme se dissipent.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

structures souterraines en profondeur. Des calculs d'optimisation permettent d'obtenir des cartes des vitesses établies période par période. De cet ensemble de données on déduit, en chaque point de la zone étudiée, la courbe des vitesses en fonction de la longueur d'onde ; en d'autres termes, on cartographie la dispersion. De nouveaux calculs d'optimisation conduisent alors à un modèle tridimensionnel des vitesses de propagation en profondeur, qui indique la géométrie des interfaces géologiques, l'épaisseur de la croûte et les variations des propriétés physiques dans ces unités géologiques.

Prenons l'exemple de la Californie, où les premières tomographies fondées sur le bruit sismique ont été obtenues en 2005 par deux équipes franco-américaines. On disposait sur place d'un réseau de 62 stations sismologiques enregistrant en permanence le mouvement du sol. Nous avons utilisé ces données pour calculer, par la méthode de corrélation, les temps de trajet correspondant aux 1 891 paires possibles de stations. À partir de ces temps de trajets virtuels, nous avons cartographié la vitesse des ondes de Rayleigh et ainsi déterminé l'extension en profondeur des structures géologiques de surface *(voir la figure 4)*.

Maurice Mashaal

**5. LE PITON DE LA FOURNAISE** est un volcan assez prévisible pour y tester le pouvoir prédictif de l'imagerie sismique passive. Les variations relatives de la vitesse *(v)* de propagation des ondes sismiques dans ce grand édifice volcanique ont été suivies pendant plusieurs mois. On remarque des augmentations d'environ 0,1 pour cent de cette vitesse avant chaque épisode d'éruption (*lignes vertes*), et les diminutions qui suivent ces sauts de vitesse ont clairement un aspect prédictif. Pourra-t-on adapter cette méthode d'observation aux volcans difficiles, ceux qui explosent ou qui entrent en éruption rarement, tous les 1 000 ou 10 000 ans ? La question reste posée.

## Du bruit sismique enfin rendu utile

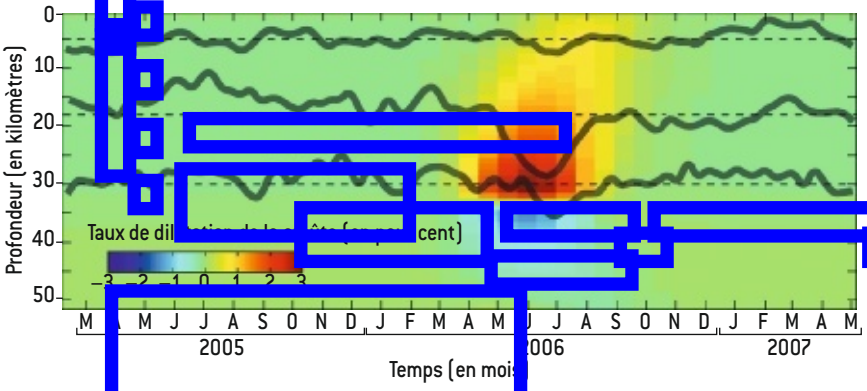
Jusqu'à l'avènement de l'imagerie sismique passive, les enregistrements de bruit utilisés dans cet exemple étaient disponibles dans les bases de données, mais inutilisés. Aujourd'hui, tant de confrères se sont mis à exploiter la méthode de corrélation que le statut du bruit sismique a changé : de nuisible qu'il était, ce signal ténu est devenu un moyen précieux pour obtenir des informations sur les structures profondes. L'imagerie par le bruit sismique ambiant a connu un si grand essor ces dernières années, qu'une grande partie du globe a déjà fait l'objet de travaux analogues à l'étude pionnière sur la Californie. Ainsi, les cartes géologiques de nombre d'endroits de la planète mal explorés ont été précisées, et des nouvelles structures géologiques découvertes.

Ces avancées de la tomographie passive constituent un grand succès. Nous allons voir que l'imagerie sismique passive offre en plus la possibilité inédite de suivre l'évolution des structures géologiques au fil du temps. Nous l'avons déjà évoqué, la vitesse des ondes sismiques – souvent la seule grandeur observable directement – est le principal indicateur de l'état des roches. Ainsi, beaucoup de descriptions de l'état physique des roches en profondeur (température, teneur en eau, etc.) sont en fait déduites des cartographies des vitesses sismiques. Or les conditions en profondeur changent, parfois de façon drastique, comme lors du dramatique mégaséisme du Japon le 11 mars 2011, où le déplacement relatif des plaques tectoniques a atteint plus de 25 mètres en quelques secondes.

De tels événements nous rappellent que la Terre se déforme continûment, à la faveur des mouvements tectoniques, des éruptions volcaniques, des séismes, etc. Peut-on détecter les petits changements de la propagation des ondes sismiques accompagnant ces déformations, de préférence avant leurs dangereux climax ? Pour cela, il importe de disposer d'une technique facile à mettre en œuvre de façon répétée et assez précise, ce qui est le cas de la méthode de corrélation.

Pour mesurer les très petits changements de la vitesse de propagation des ondes sismiques, il est nécessaire d'analyser des trajets très longs, où les retards s'accumulent. On s'appuie pour cela sur les ondes de la coda. Ce mot, qui signifie « queue » en latin, désigne la fin des sismogrammes, c'est-à-dire la fin ténue de l'enregistrement d'un séisme. Ces ondes parcourent la région autour des capteurs en suivant des trajets beaucoup plus longs que les ondes directes, de sorte qu'elles sont plus sensibles aux changements du milieu.

En collaboration avec les chercheurs de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble et de l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons utilisé en 2008 les ondes de la coda pour détecter un signal avant-coureur des éruptions du piton de la Fournaise, sur l'île de la Réunion. Les mesures de la vitesse de propagation des ondes sismiques sous cet édifice volcanique *(voir la figure 5)* montrent des variations relatives de vitesse en fonction de la date sur une durée de plusieurs mois. Or chaque chute de vitesse est suivie d'une éruption, ce qui s'explique par la déformation de l'édifice volcanique lors de la montée des matériaux éruptifs. Ce gonflement met sous tension les roches superficielles, ce qui se traduit par une chute




**6. GRÂCE À CE TYPE DE STATION SISMIQUE** *(ci-contre)*, les sismologues étudient les effets d'un séisme silencieux dans la région de Guerrero, une zone de subduction au Mexique. Ainsi, à une profondeur d'environ 30 kilomètres, une variation de la vitesse de propagation des ondes sismiques de l'ordre de 0,2 pour cent a été mise en évidence durant sept mois environ *(graphique ci-dessus)*. L'analyse en parallèle de données géodésiques a permis de conclure que cette variation de vitesse et la dilatation de la roche en profondeur sont simultanées, ce qui suggère que la première provient de la seconde.

de vitesse des ondes sismiques (de l'ordre du millième) faible, mais décelable. Ce résultat – la détection passive de signaux précurseurs des éruptions volcaniques – est très encourageant. Il n'est toutefois que préliminaire : volcan de point chaud, le piton de la Fournaise est un volcan effusif à activité régulière, donc peu dangereux et relativement prévisible. Le véritable enjeu de la prévision volcanologique reste la détection de signes précurseurs certains sur les volcans explosifs que sont les volcans de subduction (Stromboli, Vésuve, mont Saint Helens, etc.), où la rareté des grands événements bien mesurés rend difficile le test des méthodes. Il reste donc d'importants essais à mener pour valider la méthode dans de tels contextes.

Le problème des signaux précurseurs d'un séisme est comparable, mais plus difficile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'hypocentre d'un séisme, c'est-à-dire la zone qui bougera un jour, n'est pas connu d'avance. Ensuite vient le fait que les séismes commencent en profondeur, sans que ce déclenchement soit associé à des effets mesurés en surface, comme c'est le cas pour les éruptions volcaniques.

L'attention des chercheurs s'est donc portée sur les déformations de grandes amplitudes associées aux séismes une fois que ceux-ci se sont déjà produits. Ainsi, après un séisme de magnitude 6 à Parkfield, en Californie, le groupe français qui a travaillé à La Réunion a observé une chute de vitesse relative de l'ordre de 0,08 pour cent au moment du séisme, suivie d'une lente récupération en plusieurs années. Cette évolution est-elle une réponse des roches à leur déformation en profondeur, ou à l'endommagement des couches de surface dû aux fortes vibrations produites par le séisme ?

La question est très discutée. Pour faire avancer les débats en isolant l'effet de la déformation profonde, nous avons récemment entrepris de mesurer à partir du bruit sismique le changement entraîné par des séismes silencieux. On nomme ainsi des séismes importants qui se produisent lentement, c'est-à-dire jusqu'à plusieurs mois, alors qu'un séisme normal ne dure que quelques dizaines de secondes. Ces séismes ne produisent pas les vibrations destructrices des séismes classiques, et ils étaient passés inaperçus jusqu'à ce qu'on les découvre au Japon grâce à la géodésie, dans les années 2000.

## Du bruit pour sonder les séismes silencieux

Au Mexique, nous avons suivi un séisme silencieux de magnitude 7,6, qui s'est déroulé pendant environ six mois. Tout récemment, Diane Rivet, dans notre équipe à Grenoble, a montré que les déformations qu'il a produites dans la croûte terrestre ont induit un léger changement des propriétés élastiques, qui se traduit par un changement de la vitesse des ondes *(voir la figure 6)*.

Ce résultat démontre qu'il est possible d'exploiter le bruit sismique pour suivre dans le temps l'état de tension de la roche profonde. Bien entendu, d'autres facteurs que ces tensions dues au séisme sont à prendre en compte, tels les effets non linéaires des matériaux de surface, la teneur en eau des couches superficielles, la thermoélasticité, etc. Il n'en demeure pas moins que la possibilité de mesurer l'état de déformation des roches profondes est apparue. Elle pourra trouver des applications en sismologie, mais aussi dans l'industrie, par exemple pour étudier un lieu potentiel de stockage du dioxyde de carbone ou un gisement d'hydrocarbures. Le bruit sismique n'est plus un vil ensemble d'ondes parasites, mais l'utile chuchotement des océans qui nous révèle l'intérieur de la Terre, voire son évolution géologique.

## BIBLIOGRAPHIE


M. Campillo *et al.*, **Nouveaux développements de l'imagerie et du suivi temporel à partir du bruit sismique**, *Comptes Rendus Géoscience*, sous presse (publié en ligne le 1er septembre 2011, doi :10.1016/j.crte.2011.07.007).

F. Brenguier *et al.*, **Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations**, *Science*, vol. 321, pp. 1478-1481, 2008.

N. M. Shapiro *et al.*, **High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise**, *Science*, vol. 307, pp. 1615-1618, 2005.

R. L. Weaver et O. I. Lobkis, **Ultrasonics without a source : Thermal fluctuation correlation at MHz frequencies**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, pp. 134301-134304, 2003.

M. Campillo et A. Paul, **Long range correlations in the seismic coda**, *Science*, vol. 299, pp. 547-549, 2003.

T. L. Duvall *et al.*, **Time distance helioseismology**, *Nature*, vol. 362, pp. 430-432, 1993.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

**Dossier Pour la Science**

Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane…) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets plastiques… Aujourd'hui, la chimie est au centre d'une alliance durable entre les hommes et les océans.

Numéro 73, octobre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

**L'Essentiel Cerveau & Psycho**

Émotions sociales, émotions individuelles, neuropsychologie des émotions : les émotions ont une influence notable sur nos comportements et nos décisions. Dans ce nouveau numéro thématique, découvrez les émotions dans tous leurs états et apprenez pourquoi elles sont les alliées de la raison.

Numéro 7, août-octobre 2011 – Prix : 6,95 €

Format classique ou pocket

**Cerveau & Psycho**

Notre attention est-elle menacée ? Sollicitations de la publicité, des smartphones, des alertes e-mail au travail, il est de plus en plus difficile de rester concentré. Neurobiologistes et psychologues dévoilent les rouages de cette capacité.

À lire aussi : les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

Numéro 47, septembre-octobre 2011 – Prix : 6,95 €

**Numéro 48 en vente dès le 15/11.**

Format classique ou pocket

POUR LA SCIENCE

# L'astérosismologie :

**L'observation, avec les satellites CoRoT et *Kepler*, des ondes sismiques qui agitent la surface des étoiles fait entrer la physique stellaire dans une nouvelle ère**

Éric Michel, Michel Auvergne et Annie Baglin

Cette [illegible] que vous projetez d'acheter est-elle pleine ou creuse ? D'expérience, vous savez qu'il suffit de taper à sa surface et d'écouter le son qui en résulte : s'il est sourd, étouffé, le mur est plein. Si en revanche le son est « clair », il y a tout à parier que la cloison n'est pas très dense.

Analyser le son que produit un objet pour déterminer sa structure interne est une technique couramment employée par de nombreux artisans, industriels et scientifiques. Les sismologues étudient par exemple la propagation des ondes acoustiques engendrées par les séismes pour sonder l'intérieur de la Terre : l'analyse des temps de parcours les renseigne sur les différentes couches traversées.

Il en est de même avec les étoiles. Loin d'être immobiles, elles vibrent en permanence en raison de divers processus qui agitent le gaz brûlant dans leurs entrailles. Les infimes oscillations visibles en surface offrent aux astronomes un aperçu de leur structure interne.

Si le principe de cette « sismologie stellaire » ou astérosismologie, est simple, sa mise en œuvre est un véritable défi, tant en termes d'observations que de modélisation théorique. Longtemps limité par les difficultés des observations au sol, le domaine connaît une révolution depuis le lancement du satellite franco-européen CoRoT fin 2006, et du satellite américain *Kepler*, en 2009. Une avalanche de nouvelles observations d'une précision inédite apportent un éclairage nouveau sur des questions brûlantes de la physique stellaire.

## De nouvelles observables

Car contrairement à ce que l'on pourrait penser, il reste beaucoup à apprendre de la physique des étoiles. En première approximation, une étoile est une boule de gaz très chaud, née de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussière interstellaire. Lorsque le cœur est assez chaud et dense pour que s'y amorce la fusion nucléaire de l'hydrogène, la contraction s'arrête. Tant que cette source d'énergie perdure, l'étoile est en équilibre entre sa propre gravité et la pression interne. Cette phase qui dure la majeure partie de sa vie est nommée séquence principale. Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile connaît ensuite successivement des phases de contraction puis de fusion d'autres éléments, avant de connaître une fin plus ou moins violente selon sa masse initiale.

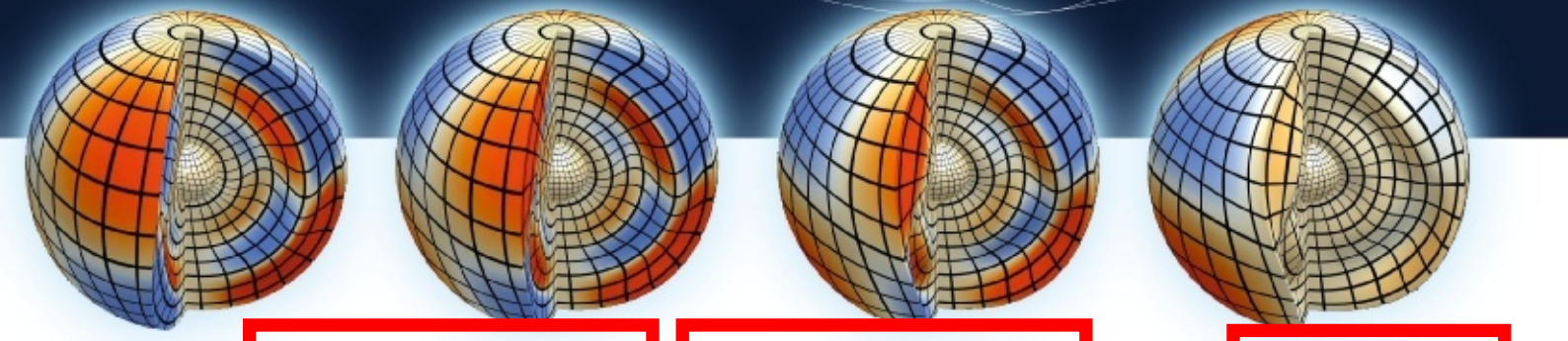
Ce tableau fait déjà intervenir de nombreux processus physiques complexes : réactions nucléaires, interactions entre rayonnement et matière, propriétés thermodynamiques en conditions extrêmes, etc. Il est cependant loin d'être complet. De nombreux autres processus entrent en jeu : transport de l'énergie par le brassage convectif dans les couches proches de la surface, ségrégation des différents éléments chimiques au fil du temps sous l'effet de la gravité et du flux de rayonnement, mélange associé à la circulation à grande échelle induite par la rotation de l'étoile, influence d'un champ magnétique éventuel, etc. Tous ces phénomènes complexes à modéliser modifient la structure interne des étoiles, et par là, leur évolution.

Or notre compréhension actuelle des étoiles repose essentiellement sur des [illegible]



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# voir battre le cœur des étoiles



**1. SIMULATION D'UN MODE** de vibration propre d'une étoile *(sur quelques minutes de gauche à droite).*

Richard Townsend

deurs caractérisant leur surface. L'analyse spectroscopique de la lumière émise permet ainsi d'estimer la température, la composition chimique ou la gravité à la surface de l'étoile. Ces observations ont permis de comprendre les grandes lignes de la structure des étoiles et de leur évolution, mais elles apportent trop peu de renseignements sur ce qui se passe à l'intérieur. Pour mieux comprendre les étoiles, de nouvelles observables sont indispensables. C'est précisément ce qu'apporte l'astérosismologie.

## Quand les étoiles résonnent

Un grand nombre d'étoiles, à commencer par le Soleil, vibrent. Ces oscillations, qui animent une étoile dans son ensemble, résultent de la propagation de deux types d'ondes à l'intérieur de l'astre. D'une part, des ondes de pression, similaires aux ondes sonores usuelles qui sont dues à la propagation d'une perturbation de la pression au sein du gaz. D'autre part, des ondes de gravité, équivalentes à celles créées par un caillou à la surface de l'eau ; elles correspondent à la propagation d'une perturbation engendrée par un élément de volume qui oscille autour de sa position d'équilibre sous l'effet de la force d'Archimède.

Ces ondes traversent l'étoile à des vitesses qui dépendent des conditions locales de température, de densité ou de composition chimique. Elles sont réfléchies en totalité ou en partie par la surface et par l'interface entre les différentes couches. À certaines fréquences bien définies, qui dépendent des vitesses de propagation, des dimensions et de la forme de l'étoile (qui peut notamment être aplatie par la rotation), des ondes se superposent de façon que toute l'étoile vibre au même rythme. Une telle vibration constitue ce que l'on nomme un mode propre d'oscillation. Chaque mode propre correspond à une fréquence précise et à un type de déformation, où des régions de la surface et de l'intérieur de l'astre se contractent et se dilatent alternativement de façon périodique *(voir l'encadré page 74)*. On parle de modes de pression (modes P) quand des ondes de pression sont en jeu, et de modes de gravité (modes G) lorsque des ondes de gravité sont impliquées. Certains modes résultent du couplage d'un mode P et d'un mode G : ils sont dits mixtes. Comme un instrument de musique, les étoiles peuvent vibrer selon une superposition de ces fréquences fondamentales, ou modes propres.

Les modes propres sont une source d'information unique sur la structure interne d'une étoile. De même qu'un violon produit un son plus aigu qu'un violoncelle ou n'a pas le même timbre qu'une guitare, les modes propres dépendent de la structure de l'étoile : sa taille et sa forme, mais aussi la densité, la composition ou la vitesse de rotation de chaque couche influent sur les modes propres. Des modes distincts sont sensibles à différentes

### L'ESSENTIEL

- ✔ Les étoiles vibrent en permanence sous l'effet des ondes sismiques qui les traversent.
- ✔ Les modes propres d'oscillation apportent des informations sur leur composition et leur structure interne.
- ✔ Leur observation depuis l'espace révolutionne l'étude sismique des étoiles.
- ✔ L'astérosismologie apporte ainsi une vue inédite sur le cœur, la convection ou encore le champ magnétique des étoiles.

régions en apportent ainsi des informations localisées sur l'intérieur stellaire. L'amplitude et la durée de ces modes propres découlent pour leur part des mécanismes d'excitation des oscillations et des énergies mises en jeu. Nous y reviendrons.

En théorie, il suffit ainsi de mesurer les oscillations d'une étoile, d'isoler par une analyse du signal les différents modes propres dans le spectre de fréquences obtenu, puis d'« inverser le problème » pour remonter à la structure interne de l'astre.

Plus facile à dire qu'à faire. Il faut déjà mesurer ces oscillations avec une précision suffisante. On comprend depuis le début du XXe siècle comment les étoiles peuvent vibrer, et donc se contracter et se dilater localement. Ces fluctuations entraînent des variations de luminosité. En effet, les régions qui se contractent deviennent plus chaudes et plus brillantes, tandis que les régions qui se dilatent s'assombrissent en refroidissant.

En 1953, l'astronome russe Sergei Zhevakin propose un mécanisme pour expliquer l'origine des vibrations stellaires : une petite oscillation fait varier localement la pression et la température du gaz, modifiant ainsi sa capacité à bloquer le flux lumineux (son opacité). Cette variation permet le transfert de l'énergie radiative à l'oscillation, qui ainsi va gagner en énergie et en amplitude au fil des cycles. Ce mécanisme dit « de l'opacité » explique aujourd'hui un grand nombre d'étoiles pulsantes connues.

## Au cœur du Soleil

Et le Soleil ? Ce n'est qu'en 1962 que ses oscillations ont été mises en évidence. Et pour cause : la variation de luminosité correspondante, de l'ordre d'un millionième, est 1000 fois plus faible que celle des étoiles pulsantes observées à l'époque. La période caractéristique des oscillations solaires est de l'ordre de cinq minutes.

On s'est vite rendu compte que les oscillations solaires ne résultent pas d'un mécanisme d'opacité, mais de la convection. Les mouvements du gaz dans la couche convective engendrent un bruit de fond acoustique qui couvre une large gamme de fréquences. Ces oscillations aléatoires (ou stochastiques) interfèrent de façon tantôt constructive, tantôt destructive, et ont dans l'ensemble un effet nul, excepté celles dont la fréquence est proche de celle d'un mode propre, qui entrent alors en résonance. L'oscillation puise alors de l'énergie dans la convection pour gagner en amplitude.

Depuis lors, des milliers de modes propres du Soleil ont été mesurés (notamment par le satellite SOHO). Ils ont dévoilé des détails insoupçonnés de sa structure interne. On a par exemple pu établir la vitesse de rotation en fonction de la profondeur et de la latitude, ce qui a mis en évidence que la rotation différentielle visible en surface – la période de rotation est de 24 jours à l'équateur et de 31 jours à 75 degrés de latitude – se poursuit en profondeur jusqu'à la base de la zone convective, où elle laisse brutalement place à une

### COMMENT LES ÉTOILES VIBRENT

Comme d'un tambour, les étoiles peuvent vibrer selon toute une gamme d'oscillations élémentaires, ou modes propres.

Chaque mode est caractérisé par une fréquence et un type de déformation. Dans le cas d'une étoile, qui est un objet sphérique, la déformation la plus simple est le mode radial fondamental : toute l'étoile se dilate puis se contracte de façon périodique (seul le centre reste fixe). À une fréquence supérieure, il existe un second mode radial : le cœur se contracte pendant que l'enveloppe se dilate et inversement. Plus « l'ordre radial » du mode, plus le nombre de couches qui se dilatent et se contractent alternativement est élevé. L'étoile peut également vibrer suivant des modes non radiaux, qui ne respectent pas la symétrie sphérique. Par exemple, les pôles peuvent se dilater tandis que l'équateur se contracte.

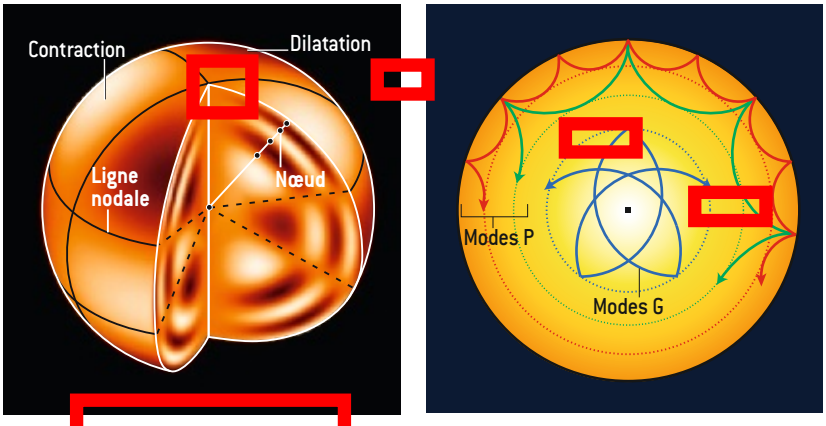
Plus le degré d'un mode est élevé, plus la surface se [illegible] tent et se contractent alternativement, séparées par des lignes qui restent immobiles, les « lignes nodales ».

Un mode propre général est ainsi déterminé par un motif spécifique de déformation en trois dimensions qui combine une déformation radiale et une déformation non radiale. Il est caractérisé par trois nombres : l'ordre radial *n*, l'ordre [illegible] et le degré [illegible].

Pour un mode de degré élevé, les déformations se compensent d'une région à l'autre de la surface (l'une se contracte pendant que l'autre se dilate), de sorte que la variation de luminosité globale est très faible. De fait, dans les étoiles autres que le Soleil, seuls les modes de degré inférieur à quatre ont été mis en évidence.

Les modes que peut exprimer une étoile ne dépendent que de sa structure interne et de sa géométrie, non du mécanisme d'excitation initial de l'oscillation. Ce dernier n'influe que sur l'amplitude des modes effectivement exprimés.

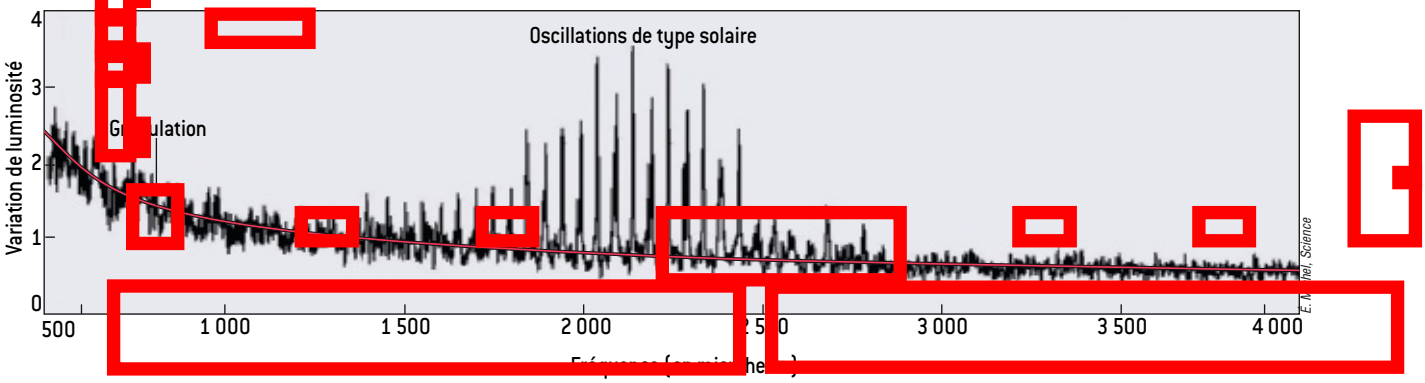
Différents modes sont sensibles à différentes régions de l'étoile. Les modes de pression de haut degré sont par exemple confinés près de la surface, tandis que ceux de bas degré se propagent à travers presque toute l'étoile. Les modes de gravité, quant à eux, sont plus sensibles au cœur de l'étoile.




À gauche, une représentation du mode de vibration $l = 4$, $m = 2$, $n = 5$. Les différentes régions de l'étoile se dilatent *(en foncé)* et se contractent *(en clair)* alternativement. Le degré $l$ est le nombre de méridiens et parallèles laissés fixes par l'oscillation, ou lignes nodales *(en noir)*. L'ordre azimutal $m$ est le nombre de méridiens nodaux. Enfin, l'ordre radial $n$ indique le nombre de nœuds le long d'un rayon *(points noirs)*. À droite, les trajectoires des ondes associées aux modes de pression *(mode P en rouge et en vert)*, qui mettent en jeu la surface et l'enveloppe de l'étoile jusqu'à des profondeurs variables, et des modes de gravité *(mode G en bleu)*, plus sensibles aux régions centrales.

© Michel/PLS


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




**2. LE SPECTRE DE FRÉQUENCE DE L'ÉTOILE PULSANTE** de type solaire HD52265 (1,2 masse solaire) observée avec CoRoT. On distingue la structure en peigne caractéristique des oscillations de type solaire. L'espacement caractéristique, nommé grande séparation, est proportionnel à la densité moyenne de l'étoile. On visualise également la composante associée à la granulation *(la courbe rouge)*.

rotation d'ensemble au-delà d'une couche très mince, nommée depuis tachocline.

Le profil de température du Soleil en fonction de la profondeur a aussi été déterminé (la température varie de 5800 kelvins en surface à près de 15 millions de kelvins dans le cœur). Ce résultat a joué un rôle fondamental dans la physique des neutrinos, ces particules presque dénuées de masse émises lors des réactions nucléaires. Au début des années 1990, on mesurait moins de neutrinos d'origine solaire que prévu. Selon l'une des explications avancées, la température au centre du Soleil était surestimée par les modèles. La détermination de la température par sismologie a écarté cette hypothèse, et conduit à établir [illegible] vent « osciller », c'est-à-dire changer périodiquement de taille (on en connaît trois).

## 100 000 étoiles en un coup d'œil

La sismologie a donc fait la preuve de son efficacité pour explorer l'intérieur du Soleil et tester des hypothèses de physique fondamentale. Qu'en est-il des autres étoiles ? Après la découverte des oscillations solaires, une chasse aux oscillations dans les étoiles de masse voisine, supposées avoir une couche convective assez épaisse pour engendrer des oscillations similaires, s'est enclenchée. Il a cependant fallu attendre 1999 pour qu'une équipe du Service d'aéronomie et de l'Observatoire de Paris détecte de façon indiscutable des oscillations de type solaire dans une autre étoile, Procyon.

Ce résultat a été obtenu par la mesure spectroscopique des « vitesses radiales ». Sous l'effet des oscillations, la surface de l'étoile s'approche et s'éloigne légèrement de l'observateur, ce qui entraîne, par effet Doppler, un décalage des raies caractéristiques du spectre lumineux de l'étoile. Cette méthode, également bien connue des chasseurs d'exoplanètes, a permis de détecter des oscillations de type solaire dans une dizaine d'étoiles. Elle est néanmoins limitée aux étoiles très brillantes et souffre du manque de continuité et de la durée limitée des observations au sol.

La sismologie stellaire devait donc se tourner vers l'espace. C'est pourquoi le projet CoRoT, conduit par le CNES (Centre national d'études spatiales), a été imaginé. CoRoT s'appuie sur la mesure ultraprécise de la luminosité des étoiles, ou photométrie. Il s'agit de mesurer les variations de luminosité, qui découlent de l'oscillation de leur surface *via* des variations de température.

Lancé en 2006, CoRoT a déjà mesuré les variations de luminosité de 125 étoiles assez brillantes avec une précision de l'ordre d'une partie par million et une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Dans le même temps, plus de 130 000 étoiles plus faibles ont été observées avec une précision et une résolution temporelle moindres. Toutes ces étoiles ont été observées de façon continue pendant un à cinq mois.

En mars 2009, le télescope spatial américain *Kepler* est à son tour entré en service. Initialement dédié à la recherche d'exoplanètes par photométrie, *Kepler* s'est révélé être un formidable outil pour l'astérosismologie : il va observer plus de 100 000 étoiles durant au moins cinq ans.

Les résultats déjà obtenus par CoRoT et *Kepler* dépassent toutes les espérances. En réduisant le bruit de deux à trois ordres de grandeur par rapport aux observations existantes, CoRoT et *Kepler* permettent d'étudier pour la première fois des phénomènes très faibles regroupés sous le terme de « microvariabilité », telles les oscillations de type solaire, les taches stellaires ou la granulation. Les observations sont encore en cours, mais les premiers résultats sont déjà exceptionnels.

## Les géantes rouges mises à nu

L'un des premiers succès de l'astérosismologie spatiale concerne les géantes rouges, des étoiles de type solaire qui ont épuisé l'hydrogène disponible dans leur cœur, et qui voient leur enveloppe se dilater et se refroidir jusqu'à occuper un rayon pouvant atteindre une centaine de fois celui du Soleil.

On connaissait moins d'une dizaine de cas d'oscillations dans les géantes rouges. Dès la première séquence d'observation de cinq mois, CoRoT en a découvert plus de 700. Un bond quantitatif accompagné d'un saut qualitatif en termes de précision, de durée et de continuité des observations. CoRoT, puis *Kepler*, ont depuis mesuré les spectres d'oscillations de milliers de géantes rouges.

Comme l'ont montré Joris de Ridder, de l'Université catholique de Louvain en Belgique, et Benoît Mosser, de l'Observatoire de Paris, et leurs collègues, ces spectres se révèlent dominés par les modes de pression. Ceux-ci suivent une répartition selon leur fréquence très similaire à celle des modes solaires, mais à des fréquences plus basses (quelques microhertz à quelques centaines de microhertz). Comme pour le Soleil, la structure du spectre caractérise l'enveloppe de l'étoile, dominée par une profonde zone convective. En combinant cette information à la température de surface, Thomas Kallinger, de

l'Université de Vienne, et ses collègues ont réussi à estimer pour la première fois le rayon d'étoiles géantes rouges, mais aussi leur masse, avec une précision de quelques pour cent.

Comme l'ont montré Andréa Miglio, de l'Université de Liège, en Belgique, et ses collègues, cette caractérisation sismique des géantes rouges permet de comparer la distribution en masse et rayon d'une population d'étoiles observée avec celle attendue théoriquement. Les premiers résultats montrent que la distribution de l'échantillon observé par CoRoT est davantage compatible avec une formation régulière d'étoiles dans la région ciblée qu'avec des épisodes récents de flambée de formation stellaire.

Au-delà des modes de pression, les spectres d'oscillation des géantes rouges ont aussi confirmé l'existence, non démontrée jusqu'alors, de modes mixtes dans ces objets. La régularité avec laquelle ces modes sont distribués selon leur période, mise en évidence dans les données de *Kepler* par Paul Beck, de l'Université catholique de Louvain, en Belgique, et ses collègues, caractérise le cœur et l'état évolutif des géantes rouges.

## Les cœurs mélangés

Il était jusqu'ici très difficile de distinguer une étoile géante rouge, brûlant de l'hydrogène « en couche » à la périphérie du cœur de son mais composé d'hélium, d'une étoile plus évoluée, où la fusion de l'hélium s'est amorcée (phase appelée « branche horizontale des géantes »). Ces deux types d'étoiles peuvent en effet paraître identiques en termes de température de surface, de rayon ou de luminosité.

Tim Bedding, de l'Université de Sydney, en Australie, et ses collègues ont montré que dans les étoiles présentant un espacement régulier de 50 à 60 secondes entre les périodes des modes mixtes successifs, l'hydrogène en couche est en phase de fusion, tandis que dans celles montrant des périodes espacées de 100 à 300 secondes, c'est l'hélium qui est en fusion.

En utilisant cette signature sismique, A. Miglio et ses collègues ont pu estimer la perte de masse qui accompagne l'allumage des réactions de fusion de l'hélium dans les géantes rouges. Leurs résultats penchent pour une perte modérée, et ils nous renseignent sur l'enrichissement du milieu interstellaire.

Autre question ouverte sur laquelle l'astérosismologie a jeté un éclairage nouveau, celle de l'« extension des cœurs mélangés ». Toutes les étoiles de la séquence principale plus massives que le Soleil ont un cœur convectif, où le mélange est rapide. La taille de ce cœur mélangé détermine la quantité d'hydrogène disponible pour les réactions nucléaires.

Or l'incertitude sur la localisation de cette limite dans les modèles fondés sur les observables de surface classiques entraîne une incertitude de plus de 20 pour cent sur la quantité d'hydrogène disponible et sur l'estimation de l'âge de ces étoiles.

### CoRoT : scruter les variations d'éclat des étoiles

Également connu comme chasseur d'exoplanètes, le satellite CoRoT (pour *Convection, Rotation, Transit*), conçu et mis en œuvre par le CNES (Centre national d'études spatiales), en collaboration avec l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Autriche, la Belgique, le Brésil, l'Allemagne et l'Espagne, est destiné à l'étude des oscillations des étoiles stellaires par photométrie (mesure des variations de luminosité) de l'étoile. Il a été lancé le 26 décembre 2006.

CoRoT a été conçu autour de trois contraintes : stabilité, durée et continuité des observations. La surface collectrice du télescope, de 27 centimètres de diamètre, est protégée de la lumière réfléchie par la Terre grâce à un cache très performant (moins d'un photon sur $10^{12}$ le franchit). La température des instruments est contrôlée au centième de degré près, et le pointage sur les capteurs ne bougent pas de plus d'un dixième de pixel (soit 0,3 seconde d'arc).

La moitié des capteurs (soit un champ de quatre degrés carrés sur le ciel) a été conçue pour observer en détail des étoiles assez brillantes (magnitudes 5,4 à 9,5) avec une résolution temporelle de une seconde. Ce champ est optimisé pour l'observation d'oscillations stellaires de faible amplitude. Le bruit de fond obtenu au terme de cinq jours d'observations cumulées est de l'ordre de la partie par million.

L'autre moitié des capteurs est optimisée pour la recherche de transits planétaires. Ce champ a été conçu pour observer jusqu'à 12 000 étoiles faibles, avec un échantillonnage de 512 secondes, ou 32 secondes pour 1 000 d'entre elles. Les courbes de lumière obtenues, avec un bruit de fond de l'ordre de dix parties par million, permettent de détecter des oscillations stellaires de grande amplitude sur de vastes échantillons.

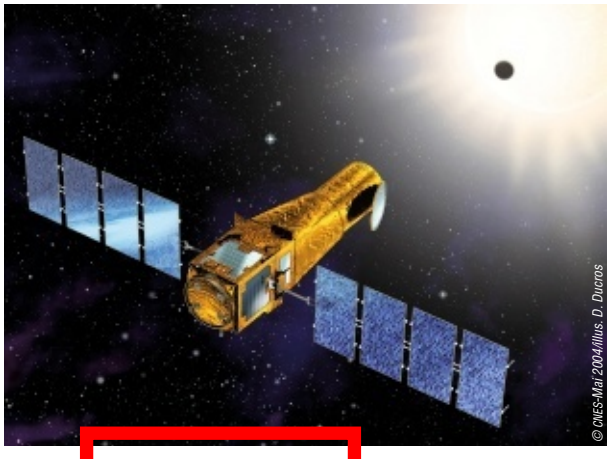
Au printemps 2009, l'impact d'une particule cosmique de haute énergie a endommagé définitivement l'ordinateur de bord et a divisé par deux le nombre d'étoiles observées dans chaque champ.

L'orbite polaire à 896 kilomètres d'altitude a été choisie pour permettre à CoRoT d'observer la même région du ciel « en tournant le dos » au Soleil pendant presque six mois. Une manœuvre de retournement est ensuite effectuée pour observer la direction opposée.

Cette continuité est cruciale, car les interruptions dans l'observation engendrent des artefacts dans les spectres de fréquences. CoRoT peut ainsi détecter en fréquence de l'ordre de 0,1 microhertz, hors de portée des observations au sol.

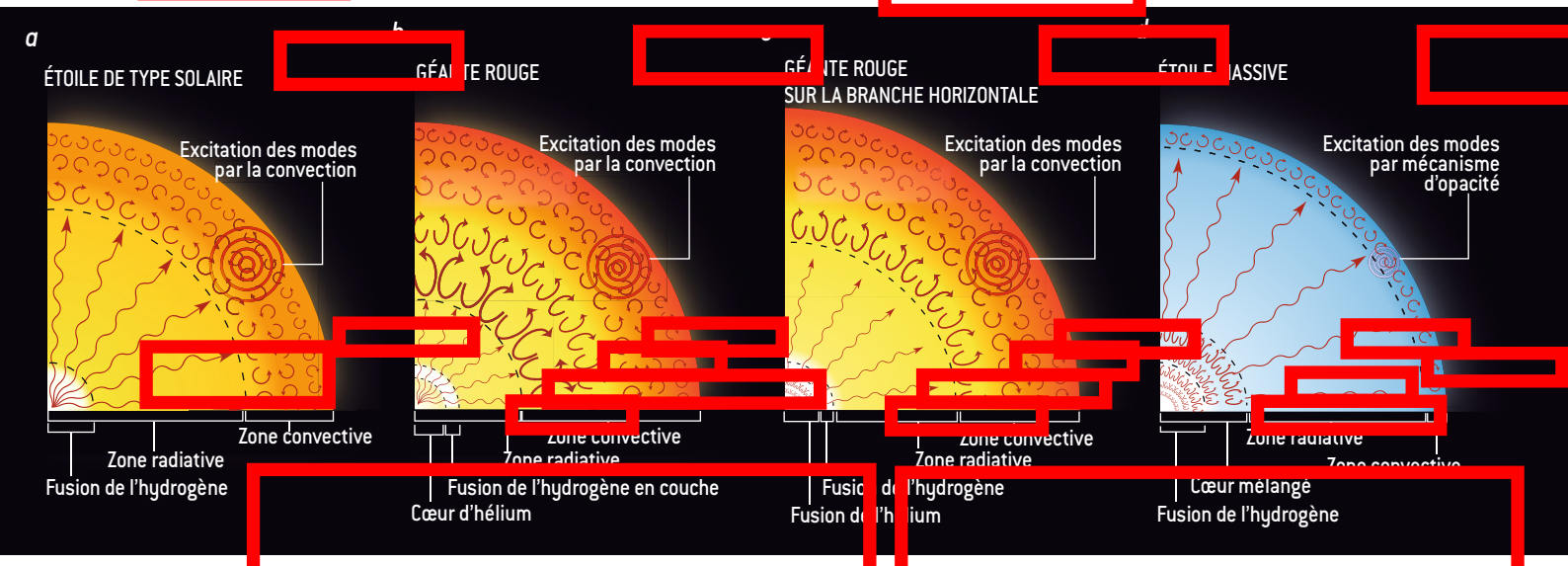
En 2009, le satellite *Kepler* de la NASA s'est ajouté à CoRoT pour la traque d'exoplanètes en transit et l'observation des oscillations stellaires. Avec un miroir de 95 centimètres, il observe un champ de 105 degrés carrés dans la constellation du Cygne et de la Lyre.

À la différence de CoRoT, *Kepler* est placé sur une orbite héliocentrique voisine de l'orbite terrestre, ce qui lui permet de pointer dans une direction perpendiculaire au plan de son orbite, d'observer les mêmes étoiles pendant plusieurs années sans être gêné par le Soleil. *Kepler* observe ainsi simultanément environ 100 000 étoiles dont les magnitudes sont comprises entre 9 et 15.





© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




**3. SELON LEUR MASSE ET LEUR STADE ÉVOLUTIF,** les étoiles ont des structures différentes. Sur la « séquence principale », les étoiles plus massives que le Soleil *(a)* sont pour l'essentiel radiatives, avec un cœur convectif. Les étoiles semblables au Soleil *(a)* sont convectives en surface et radiatives au cœur. Une fois épuisé l'hydrogène de ce dernier, elles se dilatent et refroidissent, devenant des géantes rouges *(b)*, largement convectives. Lorsque la fusion de l'hélium prend le relais *(c)*, l'étoile connaît une nouvelle phase de stabilité, la « branche horizontale des géantes ».

Peter Degroote, de l'Université catholique de Louvain, aux Pays-Bas, et ses collègues ont mis en évidence des modes de gravité dans le spectre de l'étoile de sept masses solaires HD50230, observée par CoRoT. La distribution de leurs périodes révèle un très léger décalage autour d'un espacement régulier. Ce décalage est caractéristique d'une zone de variation rapide de la densité en fonction du rayon (cette variation modifie la vitesse de propagation des ondes). Il permet notamment de localiser avec précision la limite du cœur mélangé, où la composition varie de façon brusque. Ces données ont ainsi mis en évidence que le cœur mélangé de HD50230 est au moins 25 pour cent plus massif que la valeur prédite par les modèles usuels. Elles suggèrent aussi une variation relativement douce de la composition en bordure de celui-ci.

Cette valeur élevée, au moins égale au maximum envisagé jusqu'à présent, se traduit, pour une étoile de sept masses solaires telle HD50230, par une durée de vie dans la séquence principale au moins 20 pour cent plus longue qu'attendu (supérieure à 44 millions d'années au lieu de 37).

La modélisation d'autres étoiles pulsantes de 2 à 4 masses solaires par d'autres équipes suggère également une forte extension du cœur mélangé. En revanche, la modélisation par Sébastien Deheuvels, de l'Observatoire de Paris, d'une étoile de 1,3 masse solaire commençant à brûler de l'hydrogène en couche suggère une extension modérée ou très faible du cœur mélangé. Ces résultats ne sont pas nécessairement contradictoires. L'extension du cœur mélangé nécessite sans doute une description plus élaborée, qui dépend de la masse de l'étoile, de son âge et peut-être de sa vitesse de rotation. Les résultats similaires obtenus pour un nombre croissant d'étoiles permettront de préciser cette question.

## La zone convective sous tous les angles

Le transport d'énergie par la convection est un autre sujet central de la physique stellaire. L'épaisseur de la zone convective est considérable dans les étoiles froides : elle représente près d'un tiers du rayon du Soleil, et la quasi-totalité de celui des géantes rouges. Plus petite dans les étoiles chaudes, elle reste néanmoins le lieu où les divers types d'oscillations puisent leur énergie et où est engendré le champ magnétique. Or le transport de la chaleur dans la zone convective est mal décrit, surtout dans les régions peu denses proches de la surface. Même dans le cas du Soleil, cette région reste en fait l'une des plus mal connues. Les observations de CoRoT et *Kepler* permettent d'aborder la question sous plusieurs angles.

Comme évoqué précédemment, le décalage dans la distribution en fréquence des modes permet de localiser directement des motifs structurels. Anwesh Mazumdar, du Centre *Homi Bhabha* à Bombay, en Inde, et l'un d'entre nous (Éric Michel) ont appliqué cette technique à l'étoile HD49933, observée par CoRoT. Ils ont estimé la profondeur de la « zone de seconde ionisation de l'hélium » (la région où, sous l'effet de la température, l'hélium voit ses deux électrons arrachés) avec une incertitude d'à peine dix pour cent (cette profondeur correspond à 1,7 pour cent du rayon).

La même analyse a aussi livré la profondeur de la base de la zone convective, mais ce dernier résultat semble à la limite de la précision des observations. De façon similaire, la zone de seconde ionisation de l'hélium a été localisée à sept pour cent près dans l'étoile géante rouge HR7349 par A. Miglio et des collègues. C'est la première fois qu'une telle analyse est faite sur des étoiles autres que le Soleil. L'astérosismologie apporte ainsi des mesures directes de ces interfaces, qui jouent un rôle essentiel dans les modèles stellaires.

La zone convective a également été étudiée *via* le profil des modes propres de type solaire. Si la fréquence des modes découle de la structure de l'étoile, leur amplitude et leur durée de vie dépendent des phénomènes énergétiques. La durée de vie d'un mode de type solaire est ainsi dictée par le couplage entre convection et l'oscillation, tandis que son

LES AUTEURS

**Éric MICHEL** est astronome au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et responsable du programme de sismologie stellaire du projet CoRoT.

**Annie BAGLIN** est directrice de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique principal du projet CoRoT.

**Michel AUVERGNE** est directeur de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique de l'instrumentation du projet CoRoT.



## ✔ BIBLIOGRAPHIE

S. Deheuvels *et al.*, **Constraints on the structure of the core of subgiants via mixed modes: the case of HD49385**, *Astronomy & Astrophysics*, à paraître.

T. Bedding *et al.*, **Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars**, *Nature*, vol. 471, pp. 608-611, 2011.

B. Mosser *et al.*, **The universal red-giant oscillation pattern**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 525, L9, 2011.

P. Degroote *et al.*, **Deviations from a uniform period spacing of gravity modes in a massive star**, *Nature*, vol. 464, pp. 259-261, 2010.

R. Samadi *et al.*, **The CoRoT target HD 49933. II. Comparison of theoretical mode amplitudes with observations**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 509, L16, 2010.

R. A. Garcia *et al.*, **CoRoT reveals a magnetic activity cycle in a Sun-like star**, *Science*, vol. 329, p. 1032, 2010.

A. Miglio *et al.*, **Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 503, L21, 2009.


amplitude résulte du bilan énergétique entre l'amortissement et l'excitation par la pression de convection.

Les premières mesures effectuées sur les étoiles HD49933, HD181420 et HD181906, plus chaudes que le Soleil (6300 à 6800 kelvins en surface), ont confirmé que l'amplitude des modes augmente avec la température. Elle est environ 1,5 fois supérieure à celle observée pour le Soleil, soit 25 pour cent de moins que ne le prévoyaient les modèles.

Cette différence peut être en partie expliquée par la teneur en éléments plus lourds que l'hélium (la « métallicité ») de ces étoiles. Par ailleurs, la largeur des modes – inversement proportionnelle à leur durée de vie – est trois fois plus grande que celle estimée, écart qui reste à expliquer. Ces résultats nous renseignent sur la distribution des vitesses caractéristiques de la convection et apportent des tests pour les modélisations numériques en trois dimensions.

## L'activité magnétique dévoilée par sismologie

Ce travail est actuellement étendu aux étoiles géantes rouges. Les modélisations les plus avancées sous-estiment l'amplitude des modes observés d'un facteur trois, comme le montrent les travaux de Reza Samadi, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues. C'est le signe que les échanges d'énergie entre les oscillations et les couches superficielles de l'étoile doivent encore être précisés.

Les petites cellules brillantes séparées par des parois plus sombres qui tapissent la surface du Soleil, ou granules, sont une autre manifestation de la convection. Les dimensions et la durée de vie des granules sont liées à des grandeurs caractéristiques du processus convectif. Les données de CoRoT nous ont permis, avec nos collègues, de mesurer pour la première fois le spectre de la granulation dans différentes étoiles. Pour les étoiles de classe F, plus chaudes que le Soleil, les granules se révèlent être trois fois plus grands que ceux du Soleil, et leur durée de vie 30 pour cent plus élevée. Les simulations, qui reproduisent bien ces phénomènes dans le cas du Soleil, échouent pour l'instant à reproduire la granulation de ces étoiles.

L'astérosismologie apporte également un regard neuf sur l'activité magnétique des étoiles. Le champ magnétique est un ingrédient encore très mal connu de la physique stellaire. Depuis quelques années, une nouvelle génération de spectromètres (ou spectropolarimètres) permet d'établir des cartographies de plus en plus précises du champ magnétique à la surface des étoiles. Les données de CoRoT ont pour leur part mis en évidence pour la première fois en 2010 les variations de fréquence et d'amplitude des oscillations induites par un cycle d'activité magnétique dans une autre étoile de type solaire, HD49933.

Rafael Garcia, du Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, et ses collègues ont constaté en particulier que l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente de la même façon que pour le Soleil au cours de son cycle magnétique. Ces variations résulteraient de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure. Le cycle magnétique de cette étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil serait ainsi de 120 jours, contre 11 ans pour le Soleil. La rotation, huit fois plus rapide que celle du Soleil, pourrait être à l'origine de cette différence.

Alors que la mission CoRoT a été prolongée jusqu'en 2013, l'échantillon d'étoiles observé couvre une large gamme de masses et de stades évolutifs, des étoiles comparables au Soleil jusqu'à d'autres 40 fois plus massives, et des étoiles de moins de un milliard d'années à plus de dix milliards d'années, comme certaines géantes rouges. Les données livrées par *Kepler* depuis 2009 sont en train d'élargir cet échantillon de façon spectaculaire et donneront accès à des durées d'observation de plusieurs années, hors de portée de CoRoT.

D'autres projets sont en préparation, tel BRITE, une flottille de nanosatellites dédiée à la photométrie des étoiles les plus brillantes (le lancement des deux premiers est prévu en 2012), ou PLATO, en cours d'évaluation par l'Agence spatiale européenne qui propose d'étudier les systèmes stellaires dans leur ensemble, en réalisant l'étude sismique des étoiles autour desquelles il aura détecté des planètes.

La moisson de résultats récents confirme d'ores et déjà que l'astérosismologie apporte bien le regard nouveau sur la physique stellaire que les astrophysiciens attendaient. Gageons que les années à venir seront tout aussi riches en découvertes, sinon plus !



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# 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 2012

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 €
068-2 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

# Observatoire de Paris
# Formations en Astronomie et Astrophysique

## Diplômes d'Université en présentiel

http://duop.obspm.fr/

Diplôme d'Université ou ECTS. Cours magistraux, conférences, travaux dirigés et observations, assurés par des astronomes de l'Observatoire.

**«Explorer et Comprendre l'Univers»**
Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Cours magistraux le mardi de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris et stages pratiques : une semaine à l'Observatoires de Meudon et une semaine à l'Observatoire de Haute-Provence. Accès sur le site de la formation aux vidéos des cours filmés.

**«Structuration de l'Univers»**
Exposés et préparation d'un mémoire.

*contact.duop@obspm.fr*

## Astronomie pour les Enseignants

http://formation-professeurs.obspm.fr/

Travaux pratiques, enseignements théoriques pour les enseignants. Observations. Formations aux technologies de l'informatique et de l'Internet pour l'enseignement de l'astrophysique.

*contact.formation-professeurs@obspm.fr*

## Parrainages

http://parrainages.obspm.fr/

Professeurs des écoles, collèges et lycées, demandez un «parrain» ou une «marraine» astronome de l'Observatoire pour vous conseiller et participer à votre projet concernant l'astronomie.

*contact.parrainages@obspm.fr*

## Diplômes d'Université à distance

http://foad.obspm.fr/

Formations à distance, sur Internet.
Diplôme d'Université ou ECTS. Tutorat assuré par des astronomes de l'Observatoire.

**«Astronomie et Mécanique Céleste»**
Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Du Big Bang aux planètes - Mécanique Céleste, Temps et Calendriers - Phénomènes Soleil, Terre, Lune - Le Soleil - Histoire de l'Astronomie.

*contact.amc@obspm.fr*

**«Fenêtres sur l'Univers»**
Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence ou Master (L2, L3, M1) selon les parcours choisis. Mesure de distance et de masse - Instrumentation - Chaîne de mesure et projets.

*contact.fsu@obspm.fr*

## Cours et ressources multimédia En libre accès

http://ufe.obspm.fr/ressources-multimedia

Tous niveaux :
élèves, étudiants, professeurs,amateurs, passionnés ...

l'Observatoire de Paris — UFE
Unité Formation et Enseignement

**Unité Formation et Enseignement**

OBSERVATOIRE de PARIS - 5 place Jules Janssen - 92195 Meudon

# Ondes gravitationnelles
## la bande son de l'Univers

**Bernard Schutz et Stefano Vitale**

**La mission spatiale LISA, prévue pour détecter des ondes gravitationnelles, devrait bientôt jeter un regard neuf sur des phénomènes cosmiques violents, mais jusqu'ici invisibles, tels que la fusion de deux trous noirs ou celle d'autres systèmes binaires.**

La fin du XXe siècle approche et l'astronomie. Plusieurs grands instruments, dont la mission spatiale LISA, vont bientôt nous permettre d'écouter les « sons » de l'Univers et d'ouvrir une nouvelle dimension dans l'étude du cosmos. Le concert cosmique auquel nous pouvons nous attendre s'annonce prometteur.

Bien sûr, ces sons cosmiques ne sont pas les sons usuels : l'espace est presque vide et, faute de support, les ondes acoustiques ne peuvent s'y propager. Il s'agit des ondes gravitationnelles, la propagation des vibrations de l'espace-temps lui-même. La théorie de la relativité générale décrit comment les masses déforment l'espace-temps. Ainsi, quand des corps massifs accélèrent, par exemple lorsque deux étoiles tournent l'une autour de l'autre dans un système binaire, des déformations se propagent dans l'espace-temps, un peu comme un navire engendre un train d'ondes dans son sillage. Ces ondes dites gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière.

Comme les ondes sonores ou électromagnétiques, les ondes gravitationnelles transportent l'énergie du système qui les produit. Leur existence a ainsi été prouvée indirectement par la mesure du ralentissement de la période de pulsars binaires (des couples d'étoiles à neutrons émettant des faisceaux radio périodiques), qui trahit la perte d'énergie par l'émission d'ondes gravitationnelles, en parfait accord avec les prédictions de la théorie de la relativité.

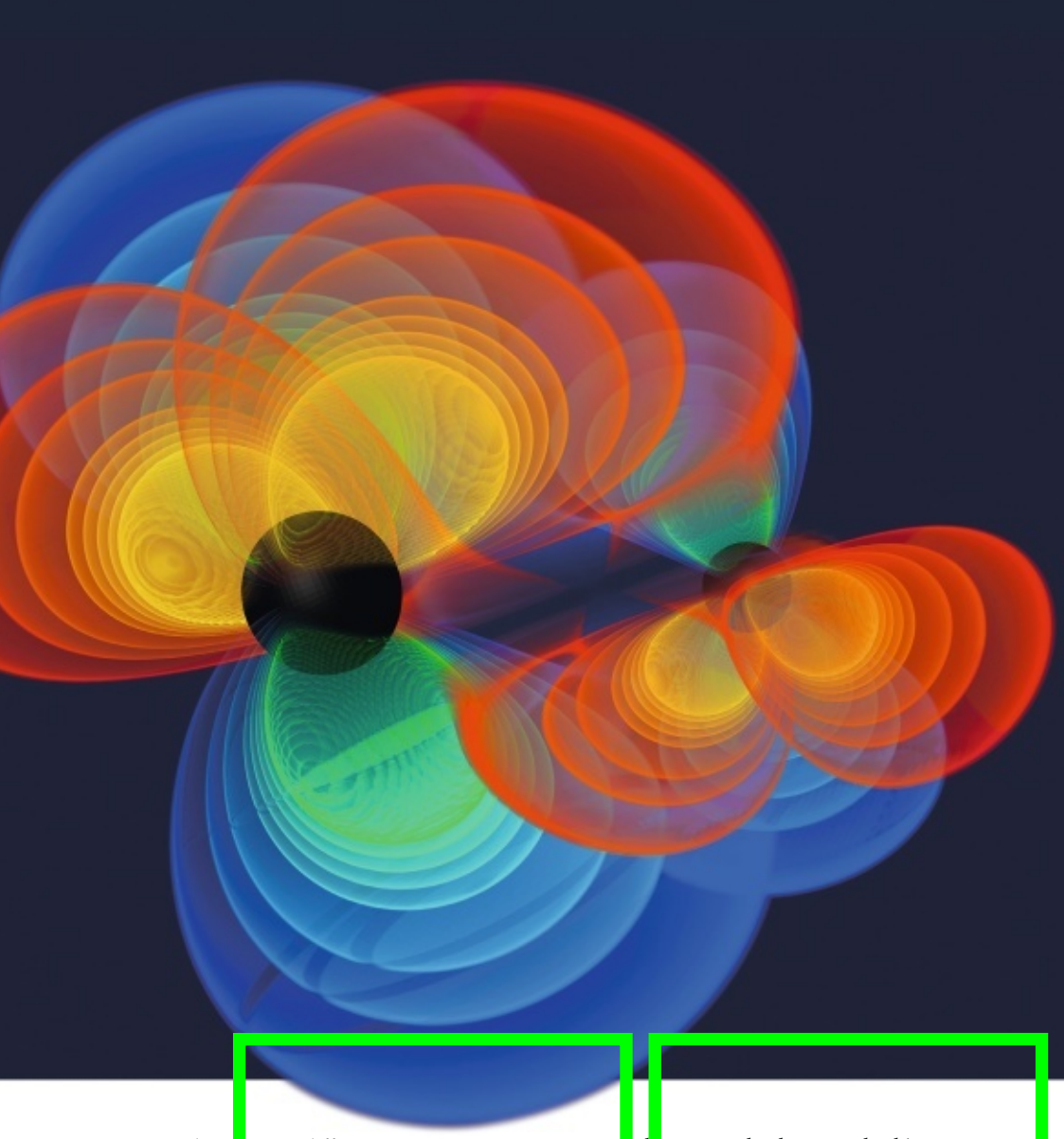
Notre connaissance de l'Univers provient presque exclusivement de la lumière, autrement dit des ondes électromagnétiques, que nous captons à l'aide d'instruments de plus en plus sensibles dans une vaste gamme de longueurs d'onde, allant des ondes radio aux rayons gamma. Toutefois, de nombreux objets et phénomènes cosmiques, tels les trous noirs supermassifs tapis au centre des galaxies, n'émettent pas de lumière et sont invisibles dans le spectre électromagnétique. Cependant, leurs mouvements provoquent une émission intense d'ondes gravitationnelles, qui traversent toute forme de matière et parviennent jusqu'à nous de partout dans l'Univers. Ainsi, si nous pouvions écouter les ondes gravitationnelles, le cosmos, qui nous semble aujourd'hui silencieux et inhabité, comme un désert, nous apparaîtrait comme une forêt vierge luxuriante remplie de

## Discrète gravité

La gravité est cependant une force difficile à observer. Elle est faible par rapport aux autres interactions fondamentales et, surtout, tous les objets plongés dans un même champ de gravitation subissent la même accélération, comme le mit en évidence Galilée. Ainsi, nous suivons tous avec la Terre la même orbite autour du Soleil, et nous « tombons » tous ensemble dans son champ de gravité. Dans un laboratoire sur Terre, à première vue, on ne peut déceler l'influence de la gravité du Soleil. Mais en y regardant de plus près, on constate que la force exercée par le Soleil est un peu plus forte dans les régions de la Terre les plus proches de l'astre, et plus faible aux points plus éloignés ; et en des points distants sur Terre, elle présente des direc-



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011



Albert Einstein Institute/Milde Science

## L'ESSENTIEL

✔ Les ondes gravitationnelles sont des vibrations dans la trame de l'espace-temps, émises par des corps massifs en mouvement, tels les trous noirs supermassifs ou les systèmes binaires compacts.

✔ Elles n'ont jusqu'ici été détectées seulement de façon indirecte.

✔ Le projet LISA, un interféromètre large de cinq millions de kilomètres et placé dans l'espace, devrait observer ici peu ces « sons de l'Univers » dans une large gamme de fréquences.

✔ Leur détection offrirait une vision inédite de l'Univers.

tions légèrement différentes pointant vers le centre du Soleil. En exerçant des forces différentes en des points distants, ces infimes variations de gravité engendrent de petites déformations sur Terre, les marées. Des marées bien plus intenses sont provoquées selon le même mécanisme par la Lune, plus petite mais beaucoup plus proche.

Les forces de marée sont ainsi le seul effet observable de la gravité exercée par les corps célestes dans un dispositif expérimental flottant librement dans l'espace. C'est aussi valable pour les ondes gravitationnelles : leur passage entraîne une modification de la courbure de l'espace-temps, et donc du champ gravitationnel, ce qui engendre des forces de marée accélérant des masses éloignées les unes par rapport aux autres.

Telle est la clef pour construire une « oreille » capable d'entendre les ondes gravitationnelles. Les interféromètres au sol *Virgo* et LIGO comportent par exemple deux bras de plusieurs kilomètres, dans lesquels un faisceau laser est envoyé et réfléchi à leur extrémité par un miroir. Ce faisceau permet de mesurer en continu

nence la longueur des bras, et de détecter une éventuelle variation due au passage d'une onde gravitationnelle.

## Le cri des systèmes binaires

Le projet LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) est construit sur le même principe, mais à une échelle plus ambitieuse : la longueur des bras est de cinq millions de kilomètres ! Trois satellites embarquant chacun deux masses d'épreuve, l'une en or et l'autre en platine, tourneront autour du Soleil en formant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté *(voir l'encadré page 87)*. Un interféromètre à laser mesurera la vitesse relative entre chaque couple de masses situées aux extrémités des bras. Au repos, les masses seront immobiles l'une par rapport à l'autre, et le passage d'une onde gravitationnelle provoquera une variation de distance et de vitesse relative qui seront mesurables. LISA mesurera ainsi des variations de vitesse inférieures à $3 \times 10^{-13}$ mètre par seconde, et ce pour des oscillations de période comprise entre dix secondes et trois heures (c'est-à-dire une fréquence allant de $10^{-2}$ à $10^{-4}$ hertz).

Développée depuis plus de deux décennies à parts égales par l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, la mission LISA devait être opérationnelle vers 2020. Mais son avenir est aujourd'hui incertain : la NASA semble déterminée à se retirer du projet, ce qui forcerait l'ESA à revoir les ambitions de la mission à la baisse. Dans la suite, nous évoquerons cependant les caractéristiques de LISA telles que cette mission a été initialement conçue.

Revenons aux ondes gravitationnelles elles-mêmes. Par quels types d'objets sont-elles émises ? Il existe au centre de nombreuses galaxies, sinon de toutes, des

**1. LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS** en orbite l'un autour de l'autre n'émet presque aucun signal électromagnétique, mais elle provoque une puissante émission d'ondes gravitationnelles, des déformations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière.

objets invisibles de grande masse, que l'on soupçonne être des trous noirs supermassifs. Les étoiles du centre de la Voie lactée gravitent par exemple autour d'un corps invisible ; leurs orbites indiquent que celui-ci a une masse d'un peu plus de quatre millions de fois celle du Soleil.

Lors des collisions de galaxies, les trous noirs supermassifs qu'elles abritent peuvent entrer en orbite l'un autour de l'autre, formant alors un système binaire. C'est une puissante source d'ondes gravitationnelles. Au début, les deux trous noirs gravitent lentement l'un autour de l'autre. Durant cette phase, le système émet déjà un intense flux d'ondes. La perte d'énergie qui en résulte fait tomber progressivement les trous noirs en spirale l'un vers l'autre, chacun tournant de plus en plus vite. La théorie indique que les ondes gravitationnelles émises par un couple de trous noirs ont une période égale à la moitié de la période de révolution du système. Ainsi, à mesure que les deux trous noirs se rapprochent, la période des ondes gravitationnelles diminue et leur fréquence augmente. À la fin, les deux trous noirs fusionnent en libérant une gigantesque bouffée d'ondes gravitationnelles.

La puissance dégagée par la fusion de deux trous noirs supermassifs est telle que LISA devrait détecter ces événements où qu'ils se déroulent dans l'Univers. LISA est conçu pour être sensible aux trous noirs de masse comprise entre 10 000 et 100 millions de masses solaires ; au-delà, la fréquence des ondes émises est trop basse. Mais comme la fréquence des ondes gravitationnelles d'un trou noir binaire augmente au fil du temps, celui-ci va émettre à un moment ou un autre des ondes gravitationnelles dont les fréquences sont détectables par LISA. De ces mesures, les astronomes déduiront la masse et la vitesse de rotation de chacun des trous noirs, et leur période de révolution l'un autour de l'autre.

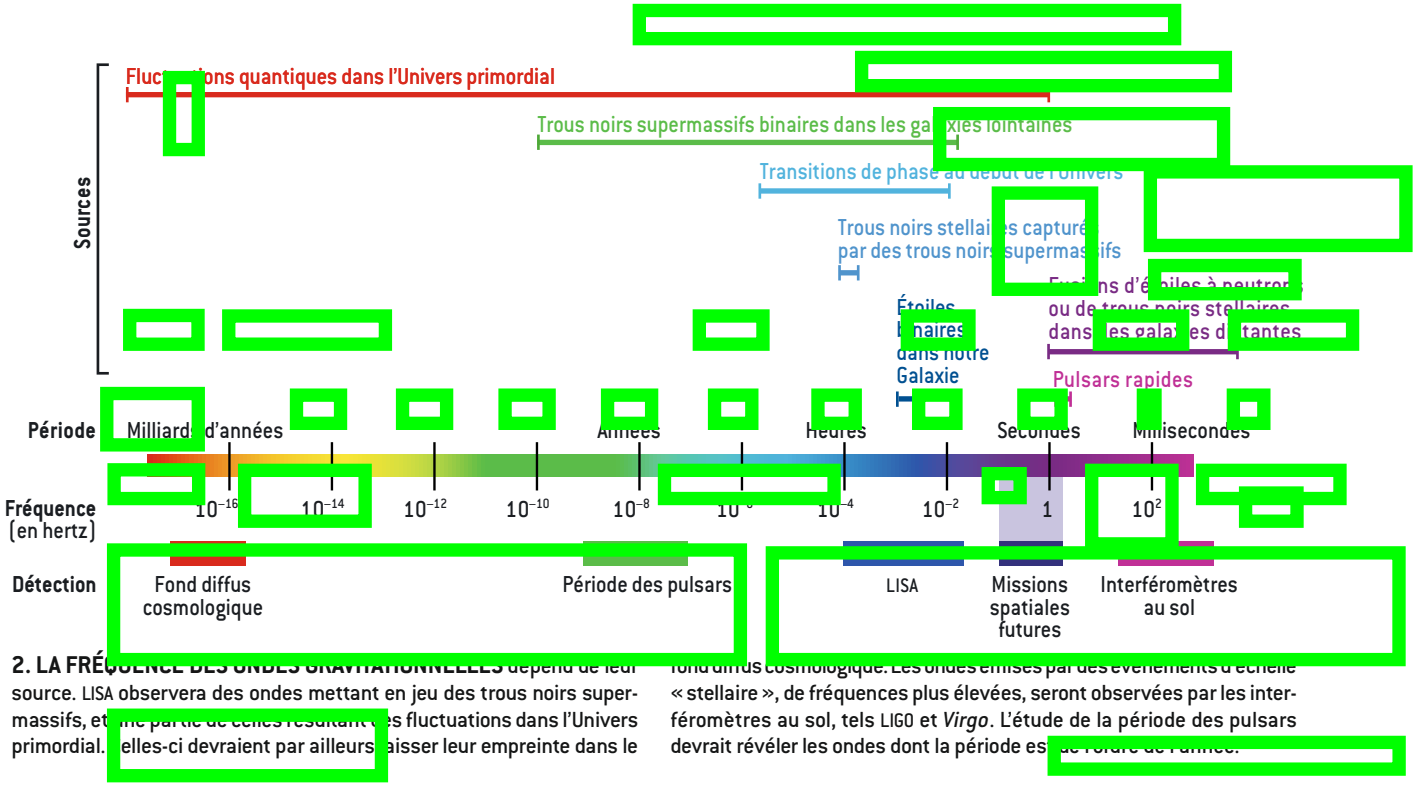
## Le chant du cygne des petits trous noirs

En raison de la vitesse de propagation finie de la lumière et des ondes gravitationnelles, observer des objets lointains revient à remonter dans le temps. Les systèmes binaires que LISA devrait révéler formeront une sorte de « stratigraphie » du cosmos, qui permettra d'en reconstituer en partie l'histoire. Les trous noirs supermassifs et leurs galaxies hôtes se sont-ils formés par la fusion de galaxies plus petites abritant chacune un trou noir plus modeste ? Quels sont les progéniteurs des premiers trous noirs, et quand sont-ils apparus ? Qu'advient-il des galaxies hôtes lorsque les trous noirs binaires centraux fusionnent ?

Le plus souvent, les trous noirs supermassifs ne sont pas en couple. Tapis au centre des galaxies, ils engloutissent parfois des étoiles qui gravitent à proximité, et sans doute aussi des petits trous noirs de masse comparable à celle du Soleil. Le trou noir supermassif exerce sur les étoiles des forces de marée si intenses qu'elles sont rapidement disloquées. Un petit objet compact tel qu'un trou noir stellaire est moins sujet aux forces de marée, et peut survivre le temps de milliers d'orbites toujours plus serrées, jusqu'à être soudain englouti lorsqu'il traverse l'horizon des événements du trou noir géant (la frontière au-delà de laquelle même la lumière ne peut plus s'échapper).

Durant sa chute, le trou noir stellaire émet une riche « chant du cygne » d'ondes gravitationnelles. On peut déduire de ce signal une carte du champ gravitationnel du trou noir central jusque dans les régions très proches de l'horizon, un peu de la même façon que l'on mesure le champ de gravité de la Terre en suivant la trajectoire de satellites en orbite. L'arrêt brutal du signal gravitationnel montrerait en outre que l'objet supermassif a un horizon des événements, et que c'est donc bien un trou noir.

En effet, la relativité générale n'interdit pas qu'il existe des points où le champ gravitationnel devient infini, mais qui sont dénués d'horizon, les « singularités nues ». L'avis généralement partagé est qu'en pratique, les singularités nues n'existent pas ; en d'autres termes, tout effondrement gra-




**2. LA FRÉQUENCE DES ONDES GRAVITATIONNELLES** dépend de leur source. LISA observera des ondes mettant en jeu des trous noirs supermassifs, et une partie de celles résultant des fluctuations dans l'Univers primordial. Celles-ci devraient par ailleurs laisser leur empreinte dans le fond diffus cosmologique. Les ondes émises par des événements d'échelle « stellaire », de fréquences plus élevées, seront observées par les interféromètres au sol, tels LIGO et *Virgo*. L'étude de la période des pulsars devrait révéler les ondes dont la période est de l'ordre de l'année.


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

## Une oreille pour écouter les « sons » cosmiques

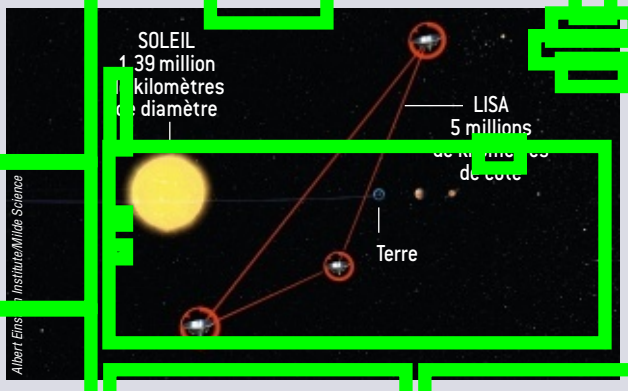
Dans sa version initiale, la mission LISA comporte trois satellites dont les orbites sont définies avec soin pour qu'ils forment à tout instant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté. Ce triangle tourne autour du Soleil et sur lui-même en un an, et est incliné de 60 degrés par rapport au plan de l'orbite terrestre.

Chaque satellite contient deux masses test : des cubes d'or et de platine de cinq centimètres de côté. Le principe de la détection des ondes gravitationnelles par LISA est de mesurer la distance entre les masses situées aux sommets du triangle. Le passage d'une onde gravitationnelle exerce une accélération sur chacune des masses, et modifie leur distance et leur vitesse relative.

Pour s'assurer que seule l'onde gravitationnelle influe sur les masses, chacune flotte librement dans son satellite, [illegible] continu et des micropropulseurs maintiennent le satellite à rester centré par rapport à elles.

Pour que LISA atteigne la sensibilité espérée, il faut que la gravitation s'exerçant sur les masses soit être $10^{-20}$ fois plus faible que leur poids sur Terre.

La mesure de la distance entre les masses [illegible] est fondée sur l'interférométrie laser : un faisceau est envoyé d'une masse à l'autre et renvoyé fléchi ; toute variation de distance entraîne par effet Doppler une variation de la fréquence du signal retourné. LISA pourra ainsi mesurer des variations de distance de $10^{-12}$ mètre, soit une variation relative de $10^{-21}$.




**LES TROIS SATELLITES DE LA MISSION LISA** formeront le plus grand objet du Système solaire.

vitationnelle ultime d'un objet engendre un trou noir. LISA nous dira si cette hypothèse dite de « censure cosmique » est correcte.

L'observation de la chute de trous noirs stellaires ou d'étoiles compactes sur des trous noirs supermassifs permettra en outre de tirer de nombreux autres enseignements sur la population d'étoiles à proximité du trou noir central ou la dynamique autour du cœur galactique.

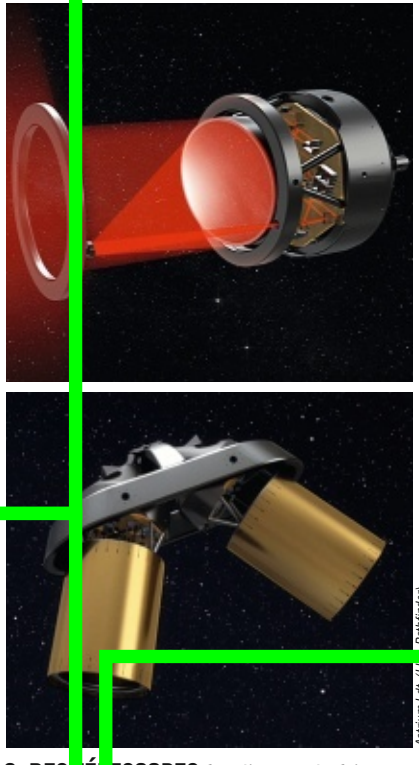
Les ondes gravitationnelles ont aussi un rôle à jouer en cosmologie. Les astronomes s'appuient d'habitude sur des étoiles qualifiées de « chandelles standards », dont la luminosité intrinsèque est supposée invariable (les supernovae de type Ia), pour estimer la distance des galaxies dans l'Univers lointain.

## Sirènes standards

Or LISA pourra mesurer la direction des sources d'ondes gravitationnelles les plus intenses avec une précision de 0,05 degré. En outre, à partir de la fréquence de l'onde et de la vitesse de variation de celle-ci, on peut estimer la masse des trous noirs binaires qui constituent la source. En croisant cette information avec l'intensité du signal reçu, on estimera ainsi avec précision la distance de cette source. Les trous noirs supermassifs binaires pourraient ainsi jouer le rôle de « sirènes standards » !

Cette liste est d'un grand intérêt pour la cosmologie. L'une des grandes découvertes de ces 15 dernières années est que l'expansion de l'Univers s'accélère depuis le début de l'histoire cosmique. On explique aujourd'hui cette accélération par l'existence d'une énergie de nature inconnue qui emplit le cosmos, l'énergie sombre, sujet pour lequel les trois lauréats du prix Nobel de physique 2011 ont été récompensés. C'est aujourd'hui l'un des sujets brûlants de la cosmologie, et plusieurs missions spatiales ont été mises en œuvre pour retracer précisément l'histoire de l'expansion. Son effet le plus visible est la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous en fonction de leur distance. L'observation des ondes gravitationnelles ne permet pas de repérer directement les galaxies hôtes, et donc de mesurer leur vitesse de fuite. Cependant, la précision angulaire de LISA suffira pour limiter quelques milliers le nombre de galaxies visibles — dont nous connaissons la vitesse de fuite — parmi lesquelles peut se trouver la source du signal gravitationnel. Un traitement statistique devrait permettre d'identifier la bonne. Cette approche offrira une méthode indépendante et d'une précision comparable aux meilleures observations pour mesurer la relation entre la distance et la vitesse de fuite des galaxies.

LISA verra bien d'autres choses, par exemple les ondes gravitationnelles émises par les milliers d'étoiles binaires compactes dans notre Galaxie. De quel type d'astres s'agit-il : naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs ? Quelle est leur masse ? Échangent-ils de la matière entre eux ? Des dizaines d'objets de ce type ont été observées avec des télescopes classiques ; la détection d'une population 1000 fois




**3. DES TÉLESCOPES** focaliseront le faisceau laser *(en haut)* émis par le satellite placé à l'autre sommet du triangle. Chaque satellite comportera deux télescopes *(en bas, dans leur enveloppe)* et deux masses d'épreuve *(à l'intérieur des parties grises, non visibles)*.

## LISA *Pathfinder*, la science de l'immobilité

Les masses d'épreuve du détecteur LISA ne doivent subir aucune autre accélération que celle induite par les ondes gravitationnelles. Pour ce faire, il faut éliminer toutes les perturbations autres que gravitationnelles. L'objectif est d'obtenir une « immobilité » telle que si deux des masses aux extrémités de l'un bras étaient arrêtées l'une par rapport à l'autre à un moment donné, elles se déplaceraient de moins d'[illegible] en deux heures.

Des données expérimentales indiquent qu'il est possible d'atteindre une telle immobilité. Toutefois, en apporter la preuve en laboratoire est impossible en raison de la gravité terrestre. Le point est si critique que l'ESA a mis sur pied une mission spatiale, LISA *Pathfinder*, pour le vérifier.

Il s'agit en quelque sorte d'une version réduite de LISA : deux masses d'épreuve seront mises en orbite, [illegible] millions de kilomètres l'une de l'autre, mais à moins de un semblable à ceux de LISA *(ci-contre)*. Un interféromètre laser mesurera leur vitesse relative.

Des [illegible]cs avec les rares molécules de gaz présentes jusqu'aux variations de la gravité dues au satellite lui-même : plusieurs facteurs contribuent à accélérer les masses. Ces perturbations ont été modélisées, et l'un des objectifs de la mission est de vérifier si ces modèles sont corrects et si des perturbations susceptibles de compromettre le succès de la mission principale n'ont pas été négligées. [illegible] mettre au point, après quoi LISA *Pathfinder* sera prêt à être lancé et à tracer la voie à la mission LISA.

plus grande par le biais de la gravitation entraînera sans doute des découvertes inattendues et devrait livrer des informations sur la formation de la Voie lactée.

Ces sources étant très nombreuses, la plupart ne pourront pas être distinguées les unes des autres ; l'ensemble créera un fond diffus d'ondes gravitationnelles, le « murmure » de la Voie lactée. Mais LISA pourrait détecter un autre fond diffus gravitationnel, à l'origine bien plus lointaine.

## Le bruit de fond diffus

La découverte et l'étude du fond cosmique de rayonnement micro-ondes ont révolutionné notre compréhension de l'Univers. Il s'agit du fossile de la première lumière, libérée environ 380 000 ans après le Big Bang, lorsque les atomes neutres se sont formés et que le contenu de l'Univers est devenu transparent aux ondes électromagnétiques. C'est une frontière indépassable pour l'observation du cosmos par le biais de la lumière.

En revanche, l'Univers a toujours été transparent aux ondes gravitationnelles. Elles offrent ainsi un moyen de remonter bien plus loin vers le Big Bang. Certains modèles cosmologiques, fondés sur la théorie des cordes (une théorie qui tente d'unifier les interactions fondamentales), prédisent par exemple l'existence d'objets appelés supercordes cosmiques. Les supercordes, créées dans l'Univers primordial et « étirées » par l'expansion cosmique, pourraient émettre un spectre caractéristique d'ondes gravitationnelles de basse fréquence. Plus tôt encore, quelques fractions de seconde après le Big Bang, les fluctuations quantiques ont pu engendrer des ondes gravitationnelles de très basse fréquence.

LISA, dans sa version initiale, pourra observer des ondes de fréquences aussi basses que $10^{-4}$ hertz. Cela correspond à des ondes émises environ $10^{-18}$ seconde après le Big Bang, quand l'Univers observable mesurait à peine un millimètre et que sa température était de $10^{15}$ degrés. Nous ignorons si le bruit de fond gravitationnel primordial est suffisamment intense pour être détecté, mais s'il était mis en évidence, il s'agirait d'une révolution dans la physique des interactions fondamentales.

Enfin, même plus près de nous, la gravité n'est pas silencieuse. Les variations de gravité dues aux oscillations internes du Soleil pourraient être révélées par LISA, et offriraient ainsi un nouvel outil pour explorer l'anatomie de notre étoile. Les astéroïdes passant à proximité du détecteur produiront également des signaux observables.

La mission préliminaire de l'ESA, nommée LISA *Pathfinder*, démontrera bientôt que les composants fondamentaux de LISA sont opérationnels *(voir l'encadré ci-dessus)*. Si le retrait de la NASA devait finalement se confirmer, le projet LISA serait revu à la baisse par l'ESA. Une version réduite avec des satellites séparés par une distance plus courte et moins de faisceaux laser, a été étudiée. La sensibilité et la résolution seraient inférieures, mais même dans cette configuration, LISA détecterait des milliers de systèmes binaires dans la galaxie et des dizaines de fusions de trous noirs supermassifs. Les astronomes seront alors aux premières loges pour écouter le concert de l'Univers. ■


LES AUTEURS

**Bernard SCHUTZ est directeur de l'Institut Albert Einstein à Potsdam en Allemagne, et cofondateur du projet LISA.**

**Stefano VITALE est professeur de physique à l'Université de Trente, en Italie, et rapporteur principal de la mission LISA *Pathfinder*.**



### ✔ BIBLIOGRAPHIE

C. Hogan, **Les sons de l'espace-temps,** *Pour la Science*, n° 357, juillet 2007.

É. Gourgoulhon, **Ondes gravitationnelles pour scruter le cosmos,** *Pour la Science*, n° 326, décembre 2004.

**Mission LISA *Pathfinder* sur le site de l'ESA :** http://www.rssd.esa.int/index.php?project=LISAPATHFINDER

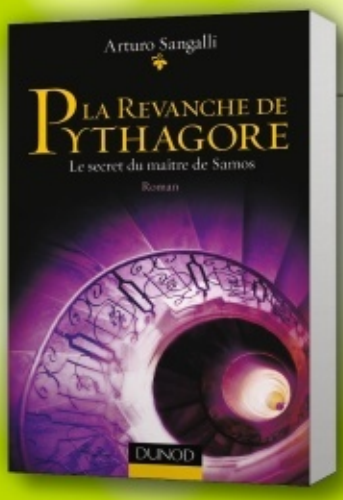
**Site de la mission LISA à la NASA :** http://lisa.nasa.gov/





© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# VARIEZ LES SAVOIRS AVEC DUNOD




**A. SANGALLI**

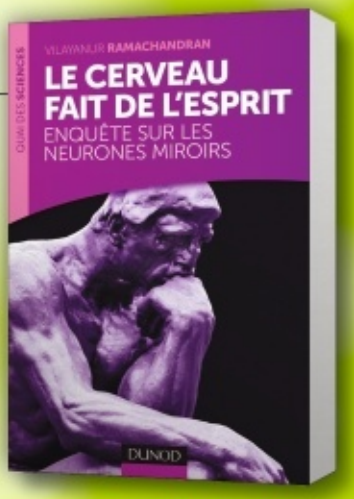
9782100565498 ▪ 240 pages ▪ **16,90 €**

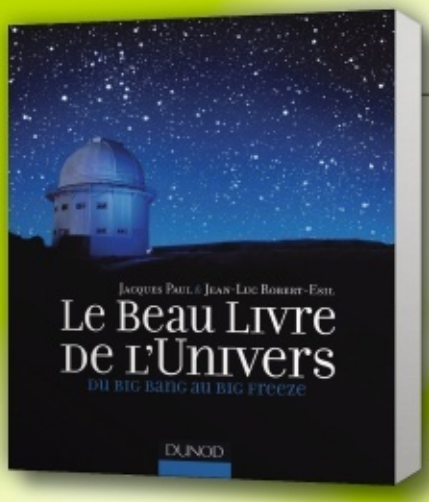
**On affirme que Pythagore n'a laissé aucun écrit.
Et si c'était faux ?
Rejoignez les deux héros de ce roman
et partez à la recherche du manuscrit perdu.**

**V. RAMACHANDRAN**

9782100543939 ▪ 416 pages ▪ **27,50 €**

**Découvrez comment l'un des plus
grands neurobiologistes envisage
ce qui fait le « propre de l'homme ».**




**J. PAUL, J.-L. ROBERT-ESIL**

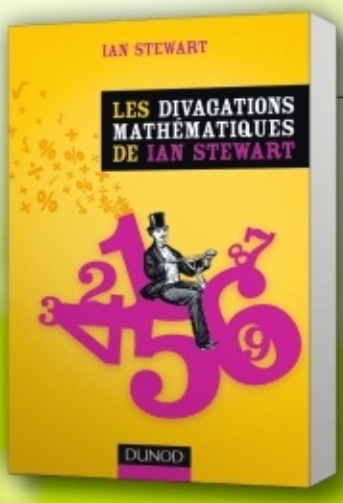
9782100567201 ▪ 420 pages ▪ **25,90 €**

**En 200 étapes magnifiquement
illustrées, déplacez-vous
le long de l'échelle du temps
et admirez les images du ciel
les plus étonnantes.**

**DUNOD / LA RECHERCHE**

9782100562992 ▪ 176 pages ▪ **16 €**

**Programmer des robots,
modéliser la chevelure humaine…
découvrez 32 situations
où « mathématiques »
rime avec « efficacité ».**




**I. STEWART**

9782100557967 ▪ 272 pages ▪ **18 €**

**Ian Stewart nous présente,
dans son style inimitable,
20 explorations mathématiques
passionnantes.**

*Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie*

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

# Les vagues en équations

**1. LES VAGUES SONT TRÈS DIFFICILES** à décrire et à prévoir de façon précise, malgré le fait que les équations de l'hydrodynamique soient connues depuis longtemps. Les phénomènes trop irréguliers, telles les vagues agitées et déferlantes créées par une tempête, échappent à l'analyse.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

## L'ESSENTIEL

- Des équations établies par Euler à la fin du XVIIIe siècle décrivent assez bien les vagues.
- Selon une analyse simplifiée de ces équations par Lagrange, la vitesse des vagues ne dépend pas de la longueur d'onde, contrairement à un résultat de Newton.
- Une analyse plus fine a montré que les résultats de Newton et de Lagrange sont tous deux valables, le premier en « eau profonde », le second en « eau peu profonde ».
- La dispersion des ondes et les effets non-linéaires sont un aspect important de la physique des vagues.

Quand on évoque la notion d'onde, le premier exemple qui vient à l'esprit est celui des vagues qui se propagent à la surface de l'eau. Ce n'est pourtant pas le plus simple. Les vagues relèvent en effet de l'hydrodynamique, dont les lois ne s'apprivoisent pas facilement. Les vagues ont beau être décrites par des équations aujourd'hui bien connues, ces équations sont riches et, potentiellement, décrivent de nombreux phénomènes différents : les ronds dans l'eau créés par la chute d'un objet, la houle, le déferlement des vagues à l'approche de la côte, la propagation des raz-de-marée, les motifs des clapotis, la remontée spectaculaire des mascarets le long des fleuves, les vagues scélérates...

Il n'est ainsi pas étonnant que les scientifiques aient longtemps tâtonné avant de disposer d'une théorie satisfaisante susceptible d'englober tous ces phénomènes. Je décrirai ici quelques-unes des étapes franchies au cours des trois derniers siècles. Je mentionnerai ensuite brièvement certaines des nombreuses questions auxquelles les mathématiciens doivent encore répondre.

Le premier résultat relatif aux vagues à la surface de l'eau – que les physiciens nomment ondes de gravité, car la pesanteur y est un acteur essentiel – remonte probablement à Isaac Newton. Dans ses *Principiae Mathematicae* de 1687, le savant britannique énonce que pour des vagues se propageant le long d'un canal, « la vitesse des ondes est en raison sousdoublée de leur largeur » ; en d'autres termes, la vitesse de déplacement des vagues est proportionnelle à la racine carrée de la longueur d'onde.

L'énoncé de Newton, qui se fonde sur une analogie assez obscure avec les oscillations d'un fluide contenu dans un tube en U, est, comme on le verra, partiellement vrai. C'était donc un véritable tour de force, puisque les équations de l'hydrodynamique étaient alors complètement inconnues : il a fallu attendre près de trois quarts de siècle pour que le mathématicien suisse Leonhard Euler obtienne les équations hydrodynamiques qui portent aujourd'hui son nom et qui constituent une formulation infinitésimale de la deuxième loi de Newton (« La force est égale au produit de la masse par l'accélération ») appliquée aux particules d'un fluide.

À la fin du XVIIIe siècle, grâce à Euler, les équations des vagues étaient donc posées. Fin de l'histoire ? Non, car ce n'est pas parce que l'on est capable de mettre les vagues en équations que l'on peut en tirer quelque chose ! Revenons par exemple sur le résultat de Newton cité plus haut, « l'un des plus obscurs et les plus difficiles de l'Ouvrage de Newton », selon Joseph Lagrange, grand mathématicien français du XVIIIe siècle. Est-il donc raisonnable d'espérer que les équations des vagues, peut-on prouver ce résultat de manière rigoureuse ?

**David Lannes**

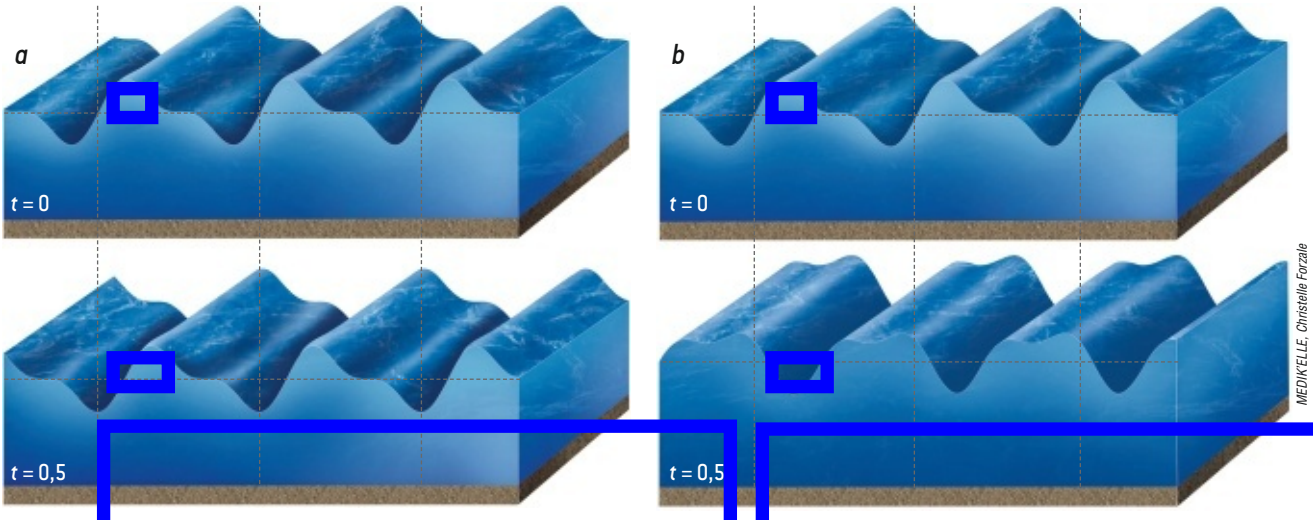
**Les principales équations qui décrivent les vagues sont connues depuis la fin du XVIIIe siècle. Il a cependant fallu beaucoup de temps pour les analyser correctement et en tirer profit – une entreprise qui n'est pas achevée**

## À quelle vitesse se propagent-elles ?

À la suite des travaux d'Euler, plusieurs mathématiciens se sont attelés à cette tâche. Lagrange en fit partie. Même si ce dernier estimait que « la résolution complète [des équations des vagues] sera peut-être toujours au-dessus des forces de l'Analyse », il se proposa de considérer de façon rigoureuse le cas « des mouvements infiniment petits ». En d'autres termes, c'est une « analyse asymptotique » des équations que Lagrange entreprit de faire.

Nous reviendrons sur cette notion d'analyse asymptotique qui est un point clef de l'étude des vagues. Pour l'instant, attardons-nous sur le résultat obtenu par Lagrange. Outre l'hypothèse que « les mouvements sont infiniment petits », Lagrange a supposé que la profondeur du canal est elle aussi petite. Cela lui permettait de rechercher, pour les équations des

© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011




MEDIKIELLE, Christelle Forzale

**2. DES VAGUES NON SINUSOÏDALES** ne se déforment pas en se propageant, selon l'analyse de Lagrange *(a)*. La configuration initiale des vagues est ici de la forme sin *x* + 0,5 sin 2*x*, ce qui correspond à la superposition de deux vagues sinusoïdales de longueurs d'onde différentes. Selon le résultat de Newton, les deux composantes sinusoïdales ont une vitesse de propagation différente, ce qui entraîne une déformation des vagues au cours du temps *(b)*. (Les paramètres choisis ici pour calculer les profils des vagues sont $g = 1$ et $H = 0{,}1$, de sorte que $gH = 1$.)

vagues, des solutions approchées qui dépendent de façon polynomiale de la coordonnée verticale $z$. Cette structure polynomiale simplifie beaucoup les équations et, après quelques calculs, Lagrange put affirmer que « la vitesse de la propagation des ondes sera celle qu'un corps grave acquerrait en tombant de la moitié de la hauteur de l'eau dans le canal ». Autrement dit, le mathématicien français affirmait que la vitesse de propagation des vagues est égale à $\sqrt{gH}$, où $g$ désigne l'accélération de la pesanteur et $H$ la hauteur de l'eau au repos.

Remarquons tout de suite que la vitesse $c_L = \sqrt{gH}$ trouvée par Lagrange ne dépend pas de la longueur d'onde ; le résultat de Lagrange contredit donc celui de Newton de façon flagrante ! Pourtant, Lagrange et Newton avaient tous deux raison (et tous deux un peu tort aussi) : comme nous le verrons, ces deux résultats constituent deux cas extrêmes d'une seule et même théorie. C'est surprenant, les deux résultats étant qualitativement très différents.

Pour bien s'en rendre compte, concentrons-nous sur le cas de vagues unidimensionnelles (c'est-à-dire qui ne varient pas selon l'une des deux directions horizontales). Prenons par exemple une vague qui, à l'instant initial, est une sinusoïde de longueur d'onde $\lambda$ ; sa forme est donc décrite par le graphe d'une fonction de la forme $a_0(x) = A \cos kx$, où $k = 2\pi/\lambda$.

Selon Newton, elle va se déplacer à la vitesse $c_N = \sqrt{g/k}$. À l'instant $t$, son profil devrait donc correspondre au graphe de la fonction :

$a(x, t) = A \cos k(x - c_N t)$.

Selon Lagrange, cette même vague est donnée au même instant par :

$a(x, t) = A \cos k(x - c_L t)$.

Elle n'est donc pas au même endroit (sauf dans le cas particulier où $c_N = c_L$, c'est-à-dire où $H = 1$, soit $H = \lambda/2\pi$), même si sa forme spatiale est identique.

On peut mettre le doigt sur la différence majeure entre le résultat de Newton et celui de Lagrange.

**Selon Newton, les vagues se déforment en se propageant. Ce n'est pas le cas selon l'analyse de Lagrange.**

superposition de telles ondes simples. Prenons ainsi une perturbation initiale qui est la somme de deux oscillations de longueurs d'onde différentes. Pour Lagrange, ces deux composantes se déplacent à la même vitesse, et la vague n'est pas déformée. Pour Newton, en revanche, les deux composantes évoluent à des vitesses différentes, ce qui induit une déformation de la vague *(voir la figure 2)*.

On peut pousser plus loin ce raisonnement. Grâce à la « transformation de Fourier », opération mathématique issue des travaux de Joseph Fourier, au XIXe siècle, on peut assimiler toute perturbation localisée de la surface du fluide à une somme infinie d'ondes sinusoïdales de longueurs d'onde différentes. Le même raisonnement que ci-dessus montre alors que, selon la théorie de Lagrange, cette perturbation localisée se propage sans se déformer. Avec la théorie de Newton, on a de nouveau une configuration différente ; non seulement la vague se déforme, mais on peut aussi montrer qu'elle s'aplatit avec une amplitude maximale qui décroît comme $1/\sqrt{t}$. L'incompatibilité des deux approches n'en est que plus frappante.

Cette petite analyse souligne ainsi l'une des conséquences frappantes de l'interdépendance de la vitesse de propagation et de la longueur d'onde. Cette interdépendance constitue un phénomène très général, nommé dispersion. Newton n'avait d'ailleurs certainement pas été trop surpris de le voir apparaître. En effet, il avait déjà mis en évidence le phénomène de dispersion dans un tout autre contexte avec ses célèbres expériences sur les prismes : c'est précisément parce que la vitesse d'une onde lumineuse dans le verre dépend de sa longueur d'onde que la lumière blanche se décompose à la traversée d'un prisme *(voir la figure 3)*.

Avant d'entrer davantage dans les détails et d'expliquer les raisons des différences entre les approches de Newton et de Lagrange, examinons quelques phé-



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

nomènes naturels et essayons de voir s'ils sont de nature dispersive (Newton) ou non dispersive (Lagrange).

On constate par exemple que les tsunamis sont de nature non dispersive. En effet, de telles vagues, créées au large par un tremblement de terre, se déforment très peu en pleine mer ; elles se propagent donc à la vitesse $c_L = \sqrt{gH}$ (soit un peu plus de 700 kilomètres par heure pour un océan profond de 4 000 mètres). Et tout comme les tsunamis, le comportement des vagues lorsqu'elles s'approchent de la côte est décrit par la théorie de Lagrange plutôt que par celle de Newton.

La théorie de Newton s'applique cependant à de nombreuses situations. Prenons-en une particulièrement intéressante, puisqu'elle fait écho aux expériences de Newton sur la décomposition de la lumière blanche. Lorsqu'une tempête crée des vagues au milieu de l'océan, celles-ci sont complètement chaotiques ; pourtant, lorsque la houle qui en résulte s'approche du rivage, elle est bien régulière. C'est la dispersion qui est responsable de cette transformation. Voyons pourquoi.

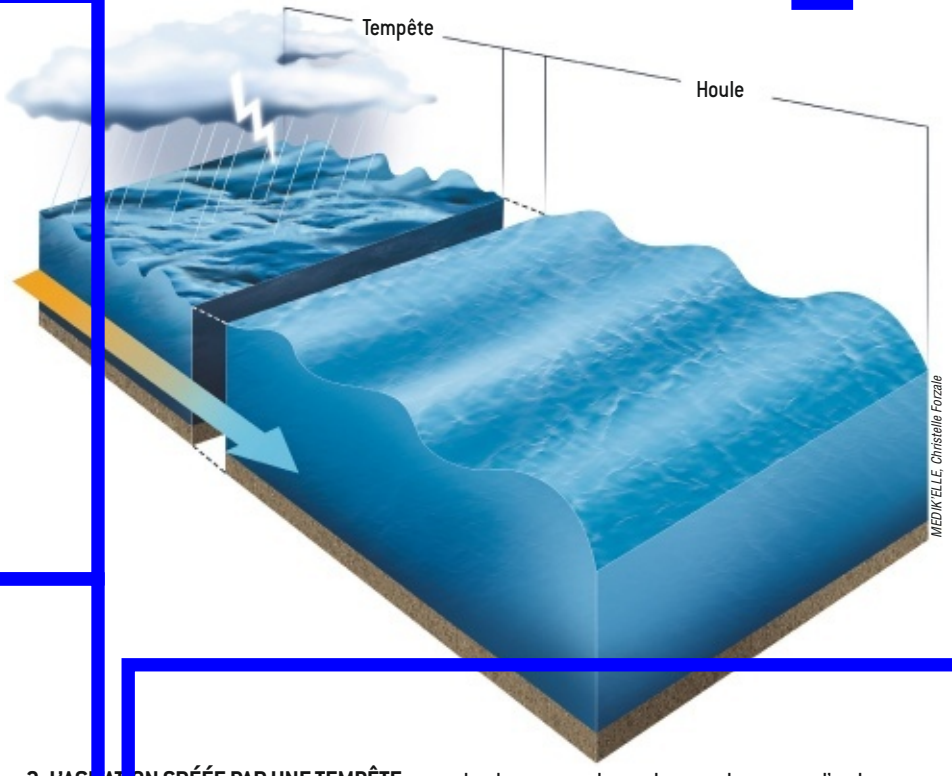
## Les vagues longues sont plus rapides

Les vagues chaotiques créées par la tempête sont comme la lumière blanche, elles contiennent des ondes de longueurs d'onde très variées, qui traversent l'océan à des vitesses différentes. L'océan joue donc le même rôle qu'un prisme pour les ondes lumineuses : il sépare les différentes longueurs d'onde. En arrivant sur une lointaine côte, les vagues de plus grandes longueurs d'onde, les plus rapides, précèdent ainsi de plusieurs heures les ondes de petite longueur d'onde. Pour les ondes lumineuses, la lumière blanche se décompose en différentes composantes colorées. Pour les vagues, le caractère « monochromatique » de la houle après avoir traversé l'océan se traduit par leur grande régularité, qui contraste avec le chaos créé par la tempête.

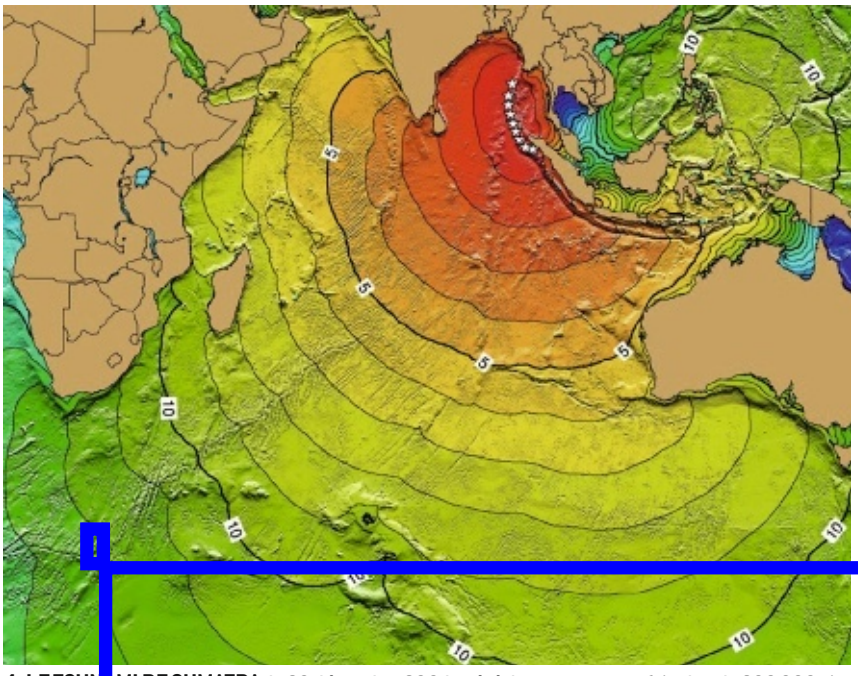
Tâchons maintenant de comprendre pourquoi les approches de Newton et Lagrange sont deux cas extrêmes d'une même théorie. Cette théorie repose sur l'équation d'Euler de l'hydrodynamique *(voir l'encadré page 95)*, qui décrit les mouvements d'un fluide incompressible et de viscosité négligeable. Moyennant quelques transformations et certaines approximation (on suppose notamment que l'amplitude des vagues est faible), on aboutit à un système d'équations qui a une solution sinusoïdale $a(x, t) = A \cos k(x - ct)$ à condition que la vitesse c soit donnée par la relation $c^2 = g \tanh(Hk)/k$, où tanh est la fonction tangente hyperbolique définie par $\tanh x = (e^x - e^{-x})/(e^x + e^{-x})$.

Lorsque la profondeur $H$ est petite, $\tanh(Hk)$ est à peu près égal à $Hk$ et on obtient donc $c \approx \sqrt{gH}$, qui est la formule de Lagrange ; si, au contraire, la profondeur $H$ est très grande, alors $\tanh(Hk) \approx 1$ et l'on a $c \approx \sqrt{g/k}$. Le résultat de Newton est donc valable en « eau profonde », et celui de Lagrange en « eau peu profonde ». Mais l'exemple des tsunamis montre qu'il faut être très prudent avec cette terminologie, d'où l'emploi des guillemets. Comme on l'a vu, un tsunami qui se propage à la surface d'un océan de 4 000 mètres de profondeur relève en effet de la théorie des vagues en eau *peu* profonde. Le paradoxe n'est qu'apparent. En effet, ce n'est pas $H$ qui doit être petit pour que l'approximation $\tanh(Hk) \approx Hk$ soit valable, mais $Hk$, égal à $H2\pi/\lambda$ où l'on rappelle que $\lambda$ est la longueur d'onde du tsunami. Or cette longueur d'onde est gigantesque, typiquement une centaine de kilomètres, si bien que $Hk \approx 0{,}25$, valeur qui est effectivement « petite »…

L'analyse que l'on vient de décrire permet de faire le pont entre le résultat de Newton et celui de Lagrange. Elle n'en reste pas moins très rudimentaire. Une première limitation évidente est qu'elle utilise des approximations linéaires, qui conduisent à une expression de la vitesse des vagues indépendante de leur taille. Or il est facile de se convaincre que cela n'est généralement pas le cas : avec une telle propriété,




**3. L'AGITATION CRÉÉE PAR UNE TEMPÊTE** engendre des vagues de nombreuses longueurs d'onde différentes. Chacune de ces composantes se propageant à une vitesse différente, elles se séparent au bout d'une distance assez grande. Ainsi, loin de la tempête, la mer n'est perturbée localement dans l'espace et le temps que par des vagues d'une seule longueur d'onde : c'est la houle. Cette séparation spatiale en différentes longueurs d'onde est analogue à la dispersion par un prisme des couleurs qui composent la lumière blanche *(en haut à droite)*. La dispersion des couleurs est également due au fait que les ondes lumineuses de longueurs d'onde différentes ont des vitesses distinctes.




NOAA

**4. LE TSUNAMI DE SUMATRA**, le 26 décembre 2004, a été destructeur et a fait plus de 200 000 victimes. Cette carte montre sa propagation, heure par heure. La vitesse d'un tsunami est de l'ordre de 700 kilomètres par heure là où la profondeur de l'océan est de 4 000 mètres. Cela correspond toutefois à un régime de propagation « eau peu profonde », car les longueurs d'onde en jeu sont très grandes, de l'ordre de la centaine de kilomètres.

on ne peut pas expliquer le déferlement des vagues. Et même sans aller jusque-là, on peut aisément observer que les vagues les plus hautes sont les plus rapides.

En 1834, l'ingénieur naval écossais Scott Russell, qui s'intéressait à la résistance opposée par l'eau à l'avancement des bateaux, fit une observation qui poussa les mathématiciens à aller au-delà de la théorie linéaire. « J'étais en train d'observer le mouvement d'un bateau tiré rapidement le long d'un canal étroit par deux chevaux lorsque celui-ci s'arrêta brusquement – mais non la masse d'eau du canal qui avait été mise en mouvement ; elle s'accumula autour de la proue du navire dans un état d'agitation violente, puis soudainement, laissant le bateau derrière elle, roula au-devant à grande vitesse, prenant la forme d'une grande élévation solitaire : cette masse d'eau ronde, lisse et bien définie, continua sa course le long du canal sans changer de forme ou ralentir apparemment. »

De telles grandes « ondes solitaires », ou « solitons », qui se propagent le long d'un canal sans se déformer, devinrent une obsession pour Russell. Il mesura en particulier leur vitesse $c$ et proposa la valeur $\sqrt{gH'}$ avec $H' = H + a_M$, où $a_M$ est l'élévation maximale de la vague par rapport au niveau de l'eau au repos. Cependant, les plus grands mathématiciens de l'époque ne crurent pas à ses observations.

Pour expliquer l'influence de la taille des vagues sur leur vitesse, le Britannique George Airy proposa en 1841 une généralisation non linéaire de la théorie de Lagrange. Considérant que le potentiel des vitesses *(voir l'encadré page ci-contre)* varie très peu suivant la verticale en eau peu profonde, et que la pression est donnée au premier ordre d'approximation par la pression hydrostatique, Airy obtint une équation non linéaire (où certains termes mettent en jeu des puissances de la fonction inconnue). Quelques années plus tard, le Français Adhémar Barré de Saint-Venant généralisa son approche en proposant un système d'équations qui porte aujourd'hui son nom et qui fait encore référence en hydraulique.

## Conjuguer la non-linéarité...

Il s'agissait bien d'une généralisation de la théorie de Lagrange. En effet, si l'on néglige les termes non linéaires de l'équation d'Airy, on trouve (en dimension 1) que le profil $a(x, t)$ des vagues doit résoudre l'équation :

$$\partial^2 a/\partial t^2 - c_L^2\, \partial^2 a/\partial x^2 = 0,$$

qui est l'« équation des ondes » se propageant à vitesse $c_L$, équation qui a exactement la même forme que celle régissant la propagation de la lumière dans le vide (l'écriture $\partial a/\partial t$ désigne la dérivée de $a(x, t)$ par rapport à $t$ en considérant $x$ constant, $\partial^2 a/\partial t^2$ désigne la dérivée seconde de $a(x, t)$ par rapport à $t$, etc.).

De cette équation on déduit que toute perturbation de la surface se décompose en deux composantes, l'une se propageant vers la gauche de l'axe O$x$, l'autre vers sa droite, toutes deux avec une vitesse $c_L = \sqrt{gH}$. La vague se dirigeant vers la droite, par exemple, obéit à l'« équation de transport » à vitesse $c_L$, qui s'écrit :

$$\partial a/\partial t - c_L\, \partial a/\partial x = 0.$$

On a ainsi retrouvé le résultat de Lagrange : la vague voyage à la vitesse $c_L = \sqrt{gH}$. Mais on peut maintenant poursuivre l'analyse en prenant en compte les non-linéarités des équations d'Airy ou de Saint-Venant. En ne retenant que la non-linéarité dominante, on montre que l'équation de transport devient :

$$\partial a/\partial t - c_L(1 + 3a/2H)\, \partial a/\partial x = 0.$$

Il s'agit donc d'une équation de transport non linéaire, où la vitesse $c_L(1+3a/2H)$ dépend de l'amplitude $a(x, t)$ de la vague. D'observations similaires, Airy avait tiré plusieurs conclusions. L'une d'elles était que la vitesse au sommet de la vague est donnée par $\sqrt{gH}(1 + 3a_M/2H)$, et non par $\sqrt{gH'}$ avec $H' = H + a_M$ comme l'avait suggéré Russell d'après ses mesures.

Une deuxième conclusion était qu'il ne peut y avoir de vague se propageant à vitesse constante sans se déformer, car cela impliquerait que la vitesse $c_L(1 + 3a/2H)$ prenne en tout point de la vague la même valeur et donc que la vague est plate ($a$ = constante).

Enfin, une troisième conclusion d'Airy était que toutes les vagues déferlent : comme le haut de la vague se déplace plus vite que le bas, il y aura nécessairement un moment où la partie supérieure passera par-dessus la base de la vague.

Les conclusions d'Airy étaient une grande avancée théorique et même pratique puisqu'elles lui ont permis d'expliquer le phénomène des mascarets, ces vagues liées à la marée qui remontent le cours de certains fleuves. L'onde de marée est très « plate » (sa période est de 12 heures et son amplitude de quelques mètres au plus), mais les non-linéarités la raidissent lorsqu'elle remonte un fleuve, créant ainsi ce phénomène spectaculaire.

Les travaux d'Airy n'ébranlèrent toutefois pas Russell dans [illegible]



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

nier maintenant que ses « ondes solitaires » se propagent à la vitesse $\sqrt{gH'}$, sans se déformer et sans déferler ! Il objecta de plus qu'elles avaient une forme déterminée pour une taille donnée, ce que la théorie d'Airy ne permet pas d'expliquer.

Malgré les efforts de scientifiques brillants, il fallut attendre 1871 pour que le mathématicien français Joseph Boussinesq propose une explication satisfaisante de ce phénomène. L'œuvre de Boussinesq, en particulier son monumental *Essai sur la théorie des eaux courantes*, impressionne par la pertinence et la modernité des idées qui y sont introduites. La prouesse de Boussinesq fut de comprendre que l'hypothèse de pression hydrostatique sous laquelle sont obtenues les équations de Saint-Venant n'est pas toujours satisfaite. Dans certaines conditions, des effets non hydrostatiques réintroduisent de la dispersion dans les équations – rappelons que nous sommes en eau peu profonde, où s'applique la théorie non dispersive de Lagrange (par opposition à la théorie dispersive de Newton).

D'où viennent les termes dispersifs négligés par Airy ? Comme on l'a vu plus haut, le caractère non dispersif de la propagation des vagues en eau peu profonde provient d'une approximation ($c \approx \sqrt{gH}$) de la formule $c^2 = g \tanh(Hk)/k$, trouvée pour la vitesse des ondes de faibles amplitudes. En utilisant une approximation plus précise on obtient une vitesse dépendant de $k$ (donc de la longueur d'onde), ce qui réintroduit l'effet de dispersion.

## .. et la dispersion

Compte tenu de cet effet de dispersion, on montre que l'équation de transport devient :

$\partial a/\partial t + c_L(1 + 3a/2H)\,\partial a/\partial x + B\,\partial^3 a/\partial x^3 = 0$, où $B = c_L H^2/6$.

Cette équation aujourd'hui célèbre est l'équation de Korteweg-de Vries, du nom des deux savants hollandais qui l'ont redécouverte près de 20 ans après Boussinesq. Elle permet (enfin !) d'expliquer correctement les observations de Russell. Qualitativement, cela se comprend assez bien. On a vu que la dispersion fait tendre l'amplitude des ondes vers zéro (puisque ses composantes se séparent en se déplaçant à des vitesses différentes) ; inversement, la non-linéarité tend à raidir les vagues et à les faire déferler. La présence simultanée de ces deux phénomènes contradictoires neutralise leurs effets et permet à la vague de se propager sans se déformer.

Plus précisément, on montre que l'équation de Korteweg-de Vries admet des solutions de la forme $a(x,t) = f(x - c_0 t)$, où $f$ est une fonction d'une seule variable, qui représentent une onde se propageant sans déformation à une vitesse constante $c_0$. Ces solutions, que l'on peut calculer explicitement, sont conformes aux observations de Russell : leur forme dépend de leur amplitude, et leur vitesse est donnée par $c_0 = \sqrt{gH}(1 + a_m/2H)$, qui est une très bonne approximation de la formule $\sqrt{gH'}$ (avec $H' = H + a_m$) conjecturée par Russell.

Cette longue description historique a permis d'introduire les concepts clefs de

## LES ÉQUATIONS DES VAGUES

On choisit un axe vertical Oz de façon que $z = 0$ coïncide avec la surface du liquide au repos. On suppose le fond plat et situé à la profondeur $z = -H$. On note $a(x,y,t)$ la hauteur à un instant $t$ d'un point de la surface ayant pour coordonnées horizontales $x$ et $y$.

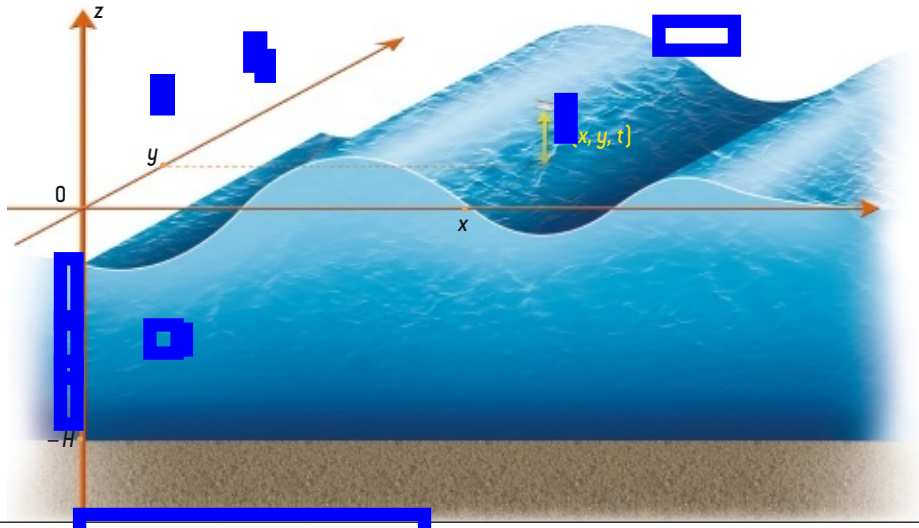
On considère un fluide de volume infinitésimal $dV$ occupant la position M($t$) au temps $t$. Soit $\boldsymbol{u}$(M($t$), $t$) le vecteur vitesse de cette particule au temps $t$, qui a pour composantes $u_x$, $u_y$ et $u_z$. On montre que son accélération (la dérivée de la vitesse par rapport au temps) s'écrit :

$d\boldsymbol{u}/dt = \partial \boldsymbol{u}/\partial t + (\boldsymbol{u}\,.\,\nabla)\boldsymbol{u}$,

équation vectorielle où $\nabla$ est l'opérateur ayant pour composantes $\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$ et $\partial/\partial z$. Par exemple, $d\boldsymbol{u}/dt = \partial \boldsymbol{u}/\partial t + u_x \partial \boldsymbol{u}/\partial x$).

Si $\rho$ désigne la densité du fluide, la masse de la particule est $\rho\,dV$. D'après la deuxième loi de Newton, $\rho\,dV\,d\boldsymbol{u}/dt$ doit être égal à la somme des forces extérieures appliquées à la particule, c'est-à-dire ici son poids $\rho\,dV\,\boldsymbol{g}$ (où $\boldsymbol{g}$ est le vecteur accélération de la pesanteur) et la force de pression (égale à $-\nabla P$, où $P$ est le champ de pression), exercée sur toute la particule. On obtient ainsi l'« équation d'Euler » :

(1) $\rho[\partial \boldsymbol{u}/\partial t + (\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}] = \rho\boldsymbol{g} - \nabla P$.




MEDIKELLE, Christelle Forzale

On suppose de plus que le fluide est incompressible et irrotationnel (pas de tourbillons) ; Euler avait déjà remarqué que ces hypothèses se traduisent élégamment par :

(2) $\boldsymbol{u} = -\nabla\phi$ et $\Delta\phi = 0$,

où $\phi$ est une fonction appelée « potentiel de vitesse », et $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$. L'équation $\Delta\phi = 0$ est l'« équation de Laplace ».

Les équations (1) et (2) sont posées à l'intérieur du fluide. Il faut aussi préciser le comportement du fluide aux bords, en l'occurrence au fond, à l'infini en direction horizontale et à la surface. Ces conditions sont les suivantes :

(3) $u_z = 0$ en $z = -H$ ;

(4) $\boldsymbol{u}$ s'annule à l'infini ;

(5) À la surface, la pression P est constante et l'expression $\partial a/\partial t + [1 + (\partial a/\partial x)^2 + (\partial a/\partial y)^2]^{1/2} u_N$, où $u_N$ est la vitesse [illegible] surface, est nulle (cette équation traduit le fait que les particules de fluide qui sont à la [illegible]).

L'ensemble des équations (1), (2), (3), (4) et (5) constitue les équations des vagues.

G. Casanave, tous droits réservés

**5. UN MASCARET DANS LA BAIE DE TURNAGAIN, EN ALASKA.** Derrière le front du mascaret, engendré par la marée, on voit de nombreuses vaguelettes s[illegible]. La compréhension de ce phénomène, comme de beaucoup d'autres dans le domaine de la physique des vagues, est encore imparfaite.


L'AUTEUR

**David LANNES, directeur de recherche au CNRS, travaille au Département mathématiques et applications de l'École normale supérieure, à Paris.**



## ✔ BIBLIOGRAPHIE

B. Alvarez-Samaniego et D. Lannes, **Large time existence for 3D water-waves and asymptotics**, *Inventiones Mathematicae*, vol. 171(3), pp. 485-541, 2008.

A. D. D. Craik, **The origins of water wave theory**, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 1-28, 2004.

O. Darrigol, **The spirited horse, the engineer, and the mathematician : Water waves in nineteenth-century hydrodynamics**, *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 58, pp. 21-95, 2003.


la description mathématique des vagues : dispersion, non-linéarité, rôle de la pression, distinction eau profonde/peu profonde, etc. Quels sont les enjeux des recherches mathématiques poursuivies aujourd'hui sur ce domaine ?

L'une des principales objections aux différents modèles mathématiques présentés ici est que l'on est en droit de remettre en doute leurs hypothèses, par exemple la nature principalement hydrostatique de la pression. Le développement de nouveaux outils mathématiques a permis depuis la fin du XX$^{e}$ siècle d'étudier les équations des vagues complètes, c'est-à-dire sans faire d'hypothèses simplificatrices sur la pression ou l'amplitude des vagues par exemple.

La première étape est de montrer que, sur un certain intervalle de temps au moins, les équations ont bien des solutions ! On doit pour cela trouver un cadre fonctionnel (un ensemble de fonctions vérifiant certaines propriétés) adapté. Par exemple, on peut imposer que la paramétrisation de la surface soit une fonction deux fois dérivable en temps et en espace. Le choix du cadre fonctionnel est beaucoup plus délicat pour le potentiel des vitesses : ce dernier est en effet défini dans un domaine fluide qui bouge au cours du temps et qui est de plus la principale inconnue du problème. Il faut donc se ramener à un espace fonctionnel « fixe ». Les mathématiciens disposent pour ce faire de plusieurs techniques.

Une fois le cadre fonctionnel choisi, on peut l'utiliser pour construire une suite de solutions approchées que l'on veut faire converger vers une solution exacte des équations. La difficulté est alors de gérer tous les phénomènes pouvant faire sortir la solution du cadre fonctionnel choisi. Par exemple, si l'on prend un cadre fonctionnel défini par les fonctions deux fois dérivables, les opérations de dérivation font « sortir » du cadre fonctionnel : la dérivée d'une telle fonction n'est pas forcément deux fois dérivable. Pour montrer que l'on reste dans un même cadre fonctionnel, il faut donc prouver que tous les mécanismes qui, à l'instar de la dérivation, font sortir de ce cadre ont des effets qui se neutralisent mutuellement.

Une fois la solution construite, on s'intéresse à la description de ses propriétés. Par exemple, comment se comporte-t-elle en eau profonde, en eau peu profonde ? Pour cela on remarque que la solution construite dépend de plusieurs paramètres (la profondeur par exemple), et on essaye de décrire la dépendance de la solution en ces paramètres : c'est « l'analyse asymptotique » de la solution.

## Maintes questions restent à explorer

Cette analyse rigoureuse permet de retrouver les modèles décrits plus haut et, surtout, de bien en déterminer leur domaine de validité. Elle permet aussi de trouver de nouveaux modèles décrivant précisément certains phénomènes plus compliqués que les ondes solitaires de Russell. Pour citer quelques problématiques actuelles : quel est le rôle de la dispersion sur l'amplitude maximale d'un tsunami ? Sur les étendues (vaguelettes secondaires) des mascarets ? Par quels mécanismes les courants naissent-ils en milieu côtier ? Comment prévoir avec précision les zones de déferlement des vagues ? Quelles sont les zones menacées en cas de vagues de grande amplitude (tempête) ?

Dictées par des préoccupations environnementales évidentes, ces questions soulèvent des difficultés mathématiques considérables. Pour plusieurs de ces phénomènes nous sommes encore comme Russell devant ses « ondes solitaires », capables d'observations assez précises, mais impuissants à fournir une théorie susceptible de les expliquer et, surtout, de les prévoir correctement.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

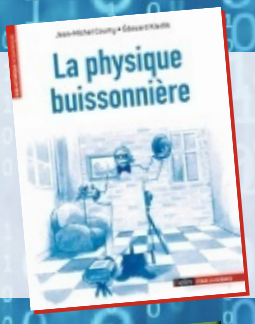
# La librairie POUR LA SCIENCE

*Le savoir scientifique au fil des pages…*

## Maux d'artistes ■ Sebastian Dieguez

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

176 pages | 25 euros • ISBN 978-2-8424-5101-1




## La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une planète 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, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

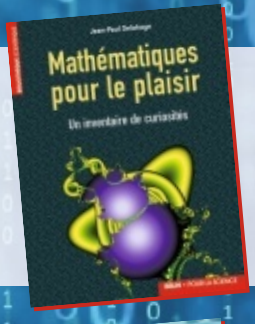
160 pages | 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

NOUVEAU

## La couleur dans tous ses éclats ■ Bernard Valeur

Comment percevons-nous les couleurs ? Pourquoi la matière émet-elle des lumières colorées ? Qu'est-ce que le jaune de Naples, le bleu outremer ou le vert Milori ? La couleur n'a pas fini de nous étonner. Voilà l'occasion de parcourir ses mystères en cinquante sujets, chacun traité en une double page illustrée pour mieux dévoiler les beautés de la couleur.

128 pages | 22,50 euros • ISBN 978-2-7011-5876-1




## Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

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. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages | 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2

NOUVELLE ÉDITION

## Ce que disent les fluides ■ Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit

Ce livre invite le lecteur à découvrir la physique des fluides à travers tourbillons, houle, turbulences, avalanches, mascarets, écoulements sanguins, etc.
Cette deuxième édition incontournable pour tous les passionnés de science a été étoffée de plusieurs sujets inédits.

176 pages • 25 euros • 978-2-7011-5725-2

**Des livres à découvrir en librairie et sur**

*www.pourlascience.fr/librairie*

**Avec des gouttes qui rebondissent sur un liquide mis en vibration, les physiciens ont découvert un système classique dont le comportement reproduit étrangement celui des particules quantiques.**

**Emmanuel Fort et Yves Couder**

# La dualité onde-corpuscule À L'ŒIL NU

Vers la fin du XIXe siècle, les choses paraissaient claires aux physiciens. Ils disposaient, pour décrire la nature, de deux types d'objets bien distincts : les objets massifs (qu'il était souvent possible de réduire à des points matériels) et les ondes. On pouvait avec ces outils conceptuels décrire les mouvements des planètes, les propriétés des gaz, la propagation du son, etc.

La lumière restait néanmoins un sujet de débat en raison de sa propagation dans le vide. Après beaucoup d'hésitations, on s'était convaincu que la lumière était une onde plutôt qu'une entité formée de particules. Cet ordre classique a été bouleversé au début du XXe siècle, notamment lorsque Einstein avança en 1905 que l'effet photoélectrique (l'expulsion d'un électron hors d'un métal éclairé) ne pouvait s'interpréter que si la lumière était formée de grains d'énergie assimilables à des particules (les photons d'aujourd'hui).

Suivant la même logique suivie en sens inverse, le Français Louis de Broglie proposa en 1923 que les particules massives devaient posséder un aspect ondulatoire. Une expérience de diffraction des électrons vint rapidement confirmer cette prédiction. Depuis cette époque, les physiciens ont admis que les systèmes obéissant à la physique quantique sont des objets singuliers qui présentent des propriétés à la fois ondulatoires et corpusculaires. C'est ce qu'il est convenu d'appeler la dualité onde-corpuscule. De plus, il est également admis que ces aspects sont complémentaires et ne peuvent être observés simultanément.

Dans les premiers modèles quantiques, les ondes en question étaient envisagées comme des ondes classiques de l'espace physique. Mais il est apparu dès la fin des années 1920 que les ondes, solutions d'une équation fondamentale découverte par l'Autrichien Erwin Schrödinger, représentaient en fait des densités de probabilité de présence et n'avaient donc qu'un sens statistique. Pour cette raison, les ondes quantiques paraissent n'avoir aucun équivalent classique.

Telle est la situation dans l'interprétation actuelle de la mécanique quantique. Elle diffère fortement de ce qu'avait envisagé de Broglie dans son ancien modèle dit de l'« onde pilote » ou de la « double solution » *(voir l'encadré page 104)*. De Broglie a supposé que chaque particule est dynamiquement associée à une onde réelle de l'espace physique qui contribue à son guidage. Dans ce modèle, l'onde solution de l'équation de Schrödinger conserve son rôle de représentation statistique. Toutefois, aucune expérience, ni classique ni quantique, n'avait jusqu'à présent permis d'observer directement le guidage d'une particule par une onde.

Or c'est un tel système que nous avons découvert dans une expérience impliquant des gouttes de liquide. Nous allons d'abord montrer comment il est possible d'obtenir un objet qui associe une onde et une particule et où l'onde guide la particule (ou la goutte). Dans la seconde partie, on montrera que les propriétés dynamiques de cet objet, telles que diverses expériences les révèlent, manifestent une forme de dualité onde-corpuscule que l'on peut comparer à la dualité quantique.

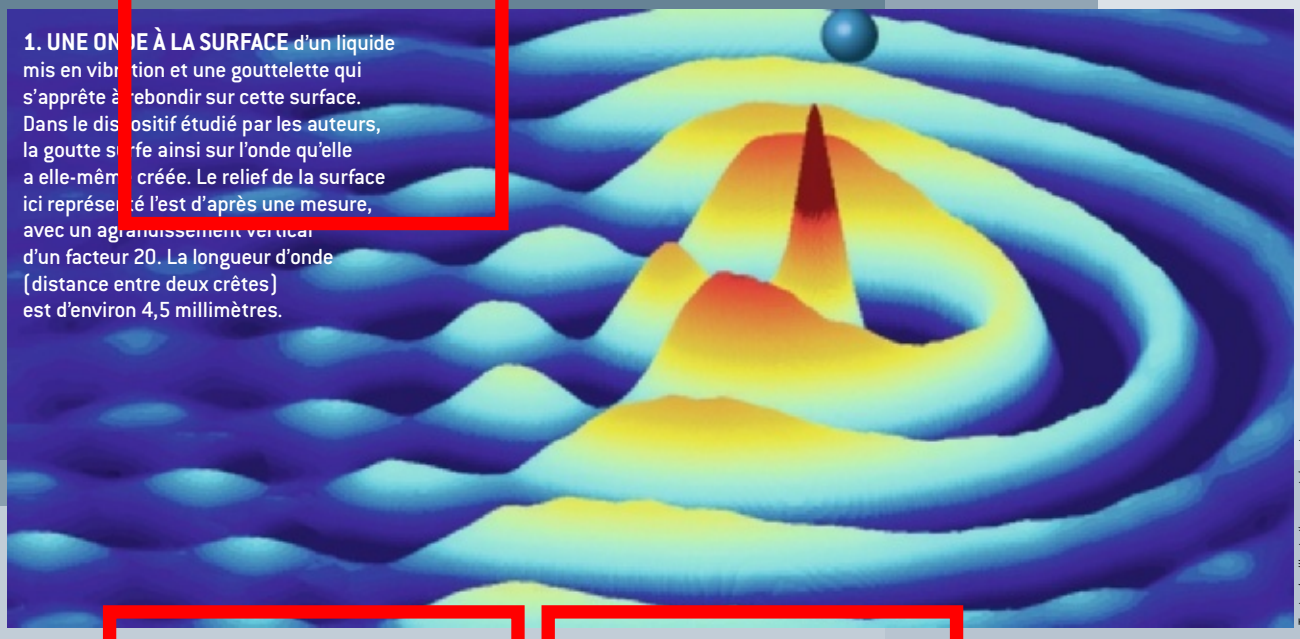
## Le « marcheur » : une goutte et son onde

Le premier germe de cette expérience est né en 2004 d'un projet de troisième année de licence à l'Université Paris Diderot. C'est un excellent exemple du bénéfice que peuvent tirer les enseignants-chercheurs de leur activité d'enseignement. Nous avions proposé à un étudiant, Charles-Henri Gautier, d'étudier expérimentalement la possibilité de non-coalescence d'une goutte liquide (de l'huile de silicone) sur un substrat du même fluide.

Dans les conditions habituelles, une goutte liquide déposée à la surface du même liquide disparaît en quelques dixièmes de seconde. C'est le temps nécessaire à la rupture du film d'air interstitiel. Lors de ce projet, nous nous sommes aperçus que cette coalescence peut être inhibée si la surface du substrat vibre verticalement *(voir l'encadré page 102)*. Lorsque l'accélération due à l'oscillation est légèrement supérieure à celle de la pesanteur, la goutte sautille sur la surface ; ce mouvement permet au film d'air qui la sépare du substrat de se renouveler à chaque oscillation. On peut ainsi maintenir



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011



**1. UNE ONDE À LA SURFACE** d'un liquide mis en vibration et une gouttelette qui s'apprête à rebondir sur cette surface. Dans le dispositif étudié par les auteurs, la goutte surfe ainsi sur l'onde qu'elle a elle-même créée. Le relief de la surface ici représenté l'est d'après une mesure, avec un agrandissement vertical d'un facteur 20. La longueur d'onde (distance entre deux crêtes) est d'environ 4,5 millimètres.

Toutes les illustrations sont des auteurs

une goutte pendant un temps illimité dans une sorte de lévitation oscillante sur la surface liquide.

Lorsque l'enseignement s'est achevé, nous avons poursuivi cette expérience dans nos laboratoires et une deuxième surprise nous y attendait. En augmentant l'amplitude de l'oscillation verticale et avec des fluides moins visqueux, nous avons vu les gouttes rebondissantes d'un diamètre millimétrique se mettre spontanément en mouvement sur la surface du fluide et « marcher » à une vitesse de l'ordre du centimètre par seconde. Nous nous sommes rapidement aperçus que cet effet était directement lié aux ondes de surface créées sur le liquide par le rebond périodique de la goutte.

## Des rebonds sur des pentes

Pour comprendre ce qui se passe aux grandes amplitudes, il faut se souvenir que si l'on fait vibrer un liquide verticalement avec une amplitude suffisante, sa surface se déstabilise spontanément pour se couvrir d'ondes stationnaires ayant une fréquence moitié de la fréquence de forçage. C'est l'instabilité dite de Faraday, celui-ci l'ayant décrite pour la première fois en 1831 *(voir l'encadré page 102)*.

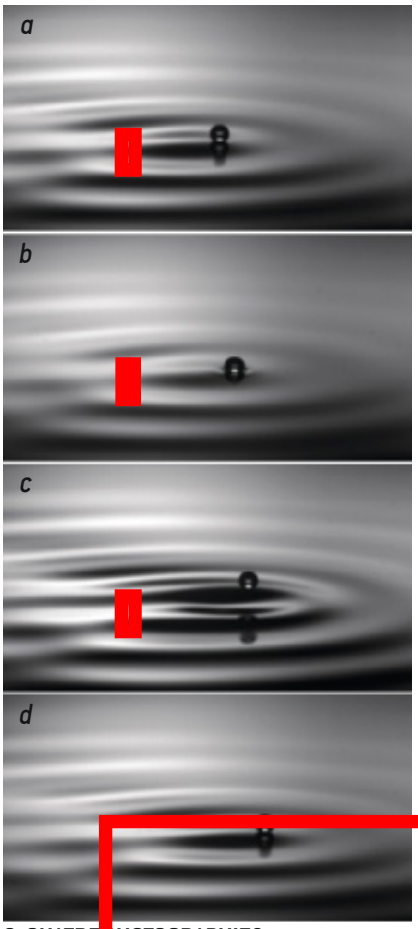
Dans nos expériences, les accélérations verticales sont toujours inférieures au seuil de cette instabilité et la surface du fluide est donc plane en l'absence de goutte. Le phénomène de marche se produit lorsque l'amplitude de l'oscillation imposée est très voisine de celle pour laquelle l'instabilité de Faraday apparaîtrait. La perturbation due à la présence de la goutte rebondissante suffit alors à déclencher localement des ondes de Faraday qui ne sont que très faiblement amorties, en un temps caractéristique qui dépend de l'écart au seuil. Ainsi, chaque choc de la goutte crée un ensemble d'ondes concentriques stationnaires centré sur le point d'impact.

Dans ces conditions, les ondes créées par les rebonds successifs forment, sous la goutte, une protubérance de plus en plus importante à mesure que l'on augmente l'excitation. Au-delà d'un certain seuil, cette situation devient instable et la goutte finit par se décoller légèrement. Elle vient ainsi rebondir sur la pente de cette protubérance centrale *(voir les figures 1 et 2)*. Ce choc sur une surface localement inclinée donne à la goutte une petite impulsion horizontale. Le mouvement est ensuite entretenu simplement par itération à chaque choc. Le mouvement d'une goutte isolée atteint ainsi un régime stationnaire où chaque cycle de rebond est identique au précédent. Comme nous l'avons montré avec Suzie Protière et Arezki Boudaoud en 2005, la goutte devient ainsi autopropulsée : elle « surfe » sur sa propre onde à une vitesse de l'ordre du dixième de la vitesse des ondes.

Le « marcheur », nom que nous donnons à l'entité formée de la goutte et de son onde, est un objet dont la dynamique n'existe que

### L'ESSENTIEL

- Il est possible de faire rebondir une petite goutte liquide sur un bain que l'on fait vibrer, et cela aussi longtemps que l'on veut.
- Le système formé de la goutte et de l'onde sur laquelle elle rebondit se déplace : c'est un « marcheur ».
- Le comportement de tels marcheurs reproduit des phénomènes qui étaient jusqu'ici caractéristiques de la mécanique quantique.
- La découverte de ce système inédit renouvelle le débat sur l'interprétation de la mécanique quantique.




**2. QUATRE PHOTOGRAPHIES** successives d'un marcheur vu de côté. Les photographies *a* et *d* ont été prises au moment où la goutte touche le liquide sur la surface inclinée de la protubérance centrale de l'onde créée par les rebonds précédents.

par l'association de l'onde et de la particule. Si la goutte fusionne avec le bain, l'onde s'évanouit. À l'inverse, si les ondes disparaissent ou sont suffisamment amorties, la goutte s'arrête. C'est donc un objet intrinsèquement dual : les ondes n'existent pas sans la goutte et cette dernière ne peut se déplacer sans les ondes qu'elle engendre. C'est, à notre connaissance, le seul objet présentant une structure dynamique duale régie par des lois classiques.

L'apparition d'une forme de dualité dans ce monde macroscopique nous a tout naturellement conduits à envisager des expériences analogues aux expériences fondatrices de la mécanique quantique, où la dualité onde-corpuscule joue un rôle central. Nous allons nous intéresser ici à deux phénomènes caractéristiques du monde quantique : l'incertitude, telle qu'elle apparaît dans les inégalités ou relations d'incertitude de Heisenberg (qui stipulent que l'on ne peut déterminer simultanément la position et l'impulsion d'une particule) et la quantification.

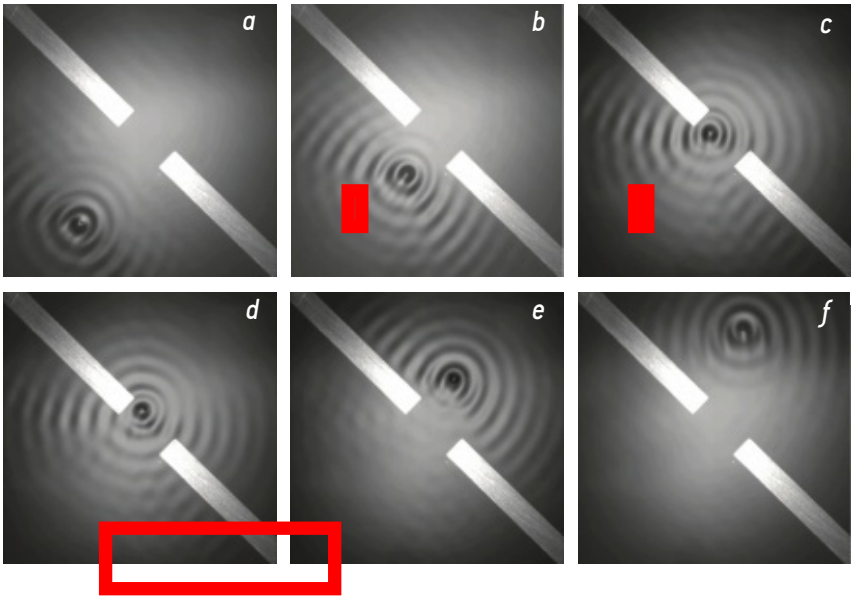
## Des interférences... au goutte-à-goutte

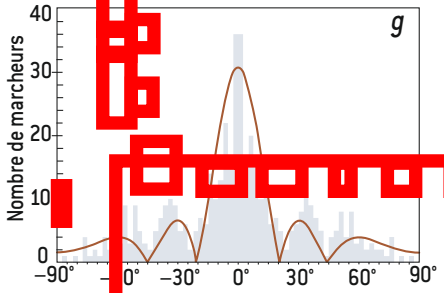
Historiquement, les observations de figures de diffraction et d'interférences ont constitué un argument déterminant en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Les expériences réalisées par l'Anglais Thomas Young vers 1802 sont parmi les plus célèbres. Une onde lumineuse plane et monochromatique arrive sur un écran opaque percé d'une ou de deux fentes de faible largeur (c'est-à-dire de l'ordre de quelques longueurs d'onde). Après passage à travers une fente unique, on observe que la lumière est diffractée, c'est-à-dire qu'une dispersion de sa direction de propagation est apparue. Avec deux fentes, cette dispersion est périodique : des zones alternativement claires et sombres sont observées ; ce sont les franges d'interférences. Ces observations ont été des preuves décisives de la nature ondulatoire de la lumière.

De telles expériences ont été reprises au début du XX$^{e}$ siècle, lorsque l'hypothèse des photons a vu le jour. On se demandait en effet ce qui se passerait dans des conditions de très faible flux lumineux, telles qu'un seul photon soit présent dans le système à chaque instant. Ces expériences, initialement réalisées avec des photons, ont été reproduites depuis, avec les mêmes résultats, pour des particules massives – électrons, atomes et même molécules.

On sait aujourd'hui détecter de telles particules une par une. Sur l'écran d'observation derrière la fente, on voit les points d'impact des particules successives, chacune paraissant avoir subi une déviation aléatoire. Toutefois, les résultats cumulés révèlent une figure de diffraction. Celle-ci émerge donc de la répartition statistique de la déviation d'un grand nombre de particules individuelles.

Dans le cas de deux fentes, on observe un comportement similaire, les impacts se répartissant comme sur une figure d'interférence. Cela signifierait qu'étrangement, chaque particule est passée à travers les deux fentes. Il est possible de faire une mesure spécifique pour savoir par où passe une particule donnée. On détecte alors




**3. CETTE SÉQUENCE DE CLICHÉS** *(a-f)* montre la diffraction d'un marcheur lors de son passage à travers une fente. L'écran est formé par une barrière sous-marine, visible en clair. La trajectoire du marcheur après son passage semble aléatoire, mais, en répétant l'expérience, on constate que la répartition statistique des angles de déviation du marcheur est comparable au profil d'amplitude résultant de la diffraction d'une onde plane par une fente *(g)*.



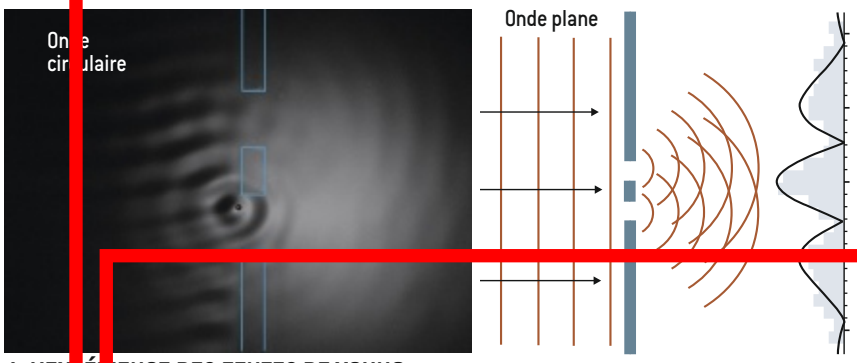
© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

son passage par l'une des deux fentes. Toutefois, une telle mesure détruit la figure d'interférence. Ainsi, selon la mesure qu'on choisit de faire, on peut déterminer par quelle fente la particule est passée, auquel cas les interférences disparaissent, ou l'ignorer et observer, par accumulation, la figure d'interférence. C'est l'un des paradoxes centraux de la mécanique quantique. Richard Feynman, dans son cours de physique quantique, écrit à propos de ces expériences d'interférence à faible flux : « Dans ce chapitre, nous traiterons immédiatement de l'élément de base du comportement mystérieux sous sa forme la plus étrange. Nous choisissons d'examiner un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible d'expliquer de manière classique et qui est au cœur de la mécanique quantique. Il contient en fait le seul mystère. »

Cette situation nous a fortement incités à tenter une expérience similaire avec des marcheurs, en les faisant passer un par un à travers une paroi percée d'une ou deux ouvertures faisant office de fentes *(voir les figures 3 et 4)*. On observe que la trajectoire d'un marcheur qui passe par une paroi à une fente est déviée. On pourrait penser qu'il existe une corrélation entre l'angle de déviation après passage par la fente et le paramètre d'impact (l'endroit précis du passage) dans la fente.

Les mesures montrent en fait que cette déviation est aléatoire. Le même marcheur, en traversant la fente au même endroit, peut être dévié soit à gauche, soit à droite. Lorsqu'on répète l'expérience de nombreuses fois, on obtient le comportement statistique, traduit par l'histogramme des déviations pour des valeurs du paramètre d'impact réparties à peu près uniformément *(voir la figure 3g)*. La plupart des marcheurs sont répartis dans un lobe central de largeur angulaire $\lambda_F/L$, entouré de pics secondaires ($\lambda_F$ étant la longueur d'onde des ondes de Faraday et $L$ la largeur de la fente). L'histogramme obtenu correspond fidèlement à la figure de diffraction d'une onde plane de longueur d'onde $\lambda_F$ traversant une fente de largeur $L$.

On peut aussi réaliser l'équivalent de l'expérience des fentes de Young avec une paroi munie de deux ouvertures *(voir la figure 4)*. L'histogramme des déviations observées correspond maintenant à la figure d'interférence d'une onde plane de longueur d'onde $\lambda_F$ traversant deux fentes de largeur $L$ séparées d'une distance $d$. Ce résultat ressemble étonnamment au résultat quantique.




**4. L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG**, classique avec la lumière, peut aussi être effectuée avec des marcheurs. Le cliché montre ainsi un marcheur qui s'approche des deux fentes. On peut noter que sa trajectoire a déjà été déviée par les ondes réfléchies sur les obstacles. On voit aussi que les ondes de la surface du liquide traversent les deux fentes. Comme pour le passage à travers une seule ouverture, la distribution statistique des déviations de la goutte *(en gris sur le schéma)* est la même que la figure d'interférence *(courbe noire)* créée par une onde incidente plane. On remarque que l'onde (plane) qui reproduit la distribution statistique est entièrement différente de celle (à peu près circulaire) qui accompagne la goutte dans une trajectoire particulière.

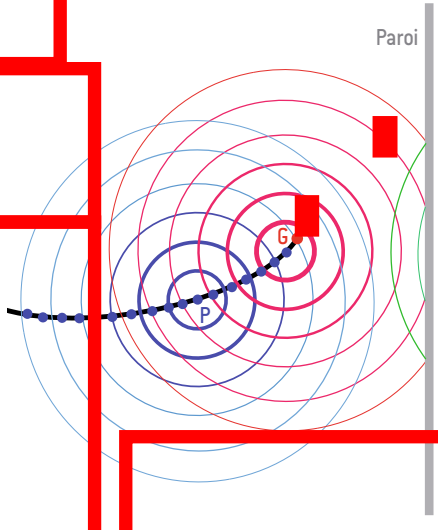
Remarquons toutefois qu'ici, pour chaque réalisation individuelle, la fente par laquelle est passée la goutte est connue et, évidemment, unique. Néanmoins, l'onde associée à la goutte traverse les deux fentes. C'est par cet intermédiaire que la trajectoire de la goutte qui traverse une fente est sensible à la présence de l'autre fente.

## Les gouttes ont une bonne mémoire

Dans les expériences précédentes, les trajectoires individuelles à proximité des fentes sont complexes et résultent de l'interaction, via les ondes, du marcheur avec son environnement.

De façon générale, le champ d'onde présent à la surface du liquide est toujours complexe parce que les ondes créées à chaque collision de la goutte avec la surface ne s'atténuent que très lentement. On peut comprendre cet effet en considérant d'abord un marcheur libre situé loin de toute paroi. Un tel marcheur a une trajectoire rectiligne. Son champ d'onde présente une structure d'interférence complexe, qui résulte de la superposition de toutes les ondes de Faraday ayant été engendrées lors des rebonds successifs de la goutte *(voir la figure 5)*. Les simulations numériques ont permis de reproduire cet effet avec précision.

Le point crucial est que ce champ d'onde dépend de la trajectoire passée de la goutte. Cette caractéristique, que nous dénommons « mémoire de chemin », est à l'origine de la spécificité de la dynamique du marcheur. De plus, il est possible de




**5. LA « MÉMOIRE DE CHEMIN »** est responsable de la complexité du champ d'onde. À un instant donné, où la goutte se trouve en G, la déformation de la surface du liquide résulte de la superposition des ondes circulaires stationnaires engendrées en tous les points que la goutte a précédemment visités *(points bleus)*. On n'a représenté ici que l'onde créée lors du choc le plus récent *(en rouge)* et une des ondes antérieures celle qui avait été produite en P, *en bleu*). La « profondeur » de la mémoire, le nombre de sources antérieures qui contribuent au guidage de la goutte, croît quand on se rapproche du seuil de l'instabilité de Faraday et que l'atténuation des ondes diminue. Enfin, à proximité d'une paroi s'ajoutent des ondes réfléchies *(en vert)*.

© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

LES AUTEURS

Emmanuel FORT est maître de conférences à l'Université Paris-Diderot et travaille à l'Institut Langevin de l'ESPCI ParisTech.

Yves COUDER est professeur émérite à l'Université Paris-Diderot et y poursuit ses recherches au Laboratoire Matière et systèmes complexes.

changer expérimentalement la profondeur temporelle de cette mémoire. En effet, celle-ci dépend directement de l'écart au seuil de l'instabilité de Faraday. Ainsi, en augmentant la vibration du bain, on obtient des champs d'onde plus complexes résultant d'un nombre croissant d'ondes produites par les chocs passés de la goutte.

Tant que le marcheur est libre de toute contrainte, la trajectoire de la goutte reste rectiligne. La situation se complique en présence d'obstacles. Dans ce cas, les ondes reviennent vers le marcheur et influent sur son mouvement. Un peu comme des chauves-souris ou des dauphins qui analysent les échos ultrasonores, le marcheur réagit aux obstacles par une interaction à distance. À proximité d'un obstacle, la pente locale sur laquelle rebondit la goutte résulte de la superposition, au point d'impact, des ondes issues directement des chocs précédents et des ondes émises antérieurement et qui se sont réfléchies sur les parois. L'impulsion reçue à chaque rebond est alors déterminée par la superposition de l'ensemble de ces ondes, superposition qui intègre de façon ondulatoire une information sur l'environnement de la goutte.

De plus, cette intégration est itérative. À chaque rebond, la trajectoire de la goutte est modifiée par la superposition, au niveau du point d'impact, de l'ensemble des ondes réfléchies et directes, émises antérieurement. La déviation élémentaire qui en résulte modifie la position de l'impact suivant, ce qui contribue en retour à modifier le champ d'onde. En d'autres termes, la dynamique du marcheur est pilotée par la distribution spatiale des sources émettrices du passé.

Cette mémoire de chemin peut être considérée comme une forme originale de non-localité spatio-temporelle. Cette non-localité se traduit en incertitude dans tous les cas où un confinement est imposé au marcheur. En effet, la dynamique fondée sur la mémoire de chemin conduit dans ce cas à des trajectoires chaotiques. C'est ce qu'on observe en particulier dans les expériences de diffraction. Le passage à travers la fente engendre des trajectoires individuelles complexes et imprévisibles qui sont à l'origine des distributions statistiques observées.

Les résultats précédents nous ont conduits à nous demander aussi quelle structure pouvait avoir le champ d'onde lorsque le mouvement du marcheur est circulaire et quel effet il aurait en retour sur la trajectoire de la goutte.

Expérimentalement, pour qu'une masse suive un mouvement circulaire, il faut lui appliquer une force constante perpendiculaire à sa vitesse. On peut penser à deux types de forces. L'une, la force de Lorentz, est la force magnétique exercée sur une charge en mouvement, l'autre la force de Coriolis qui s'exerce sur un mobile dans un système en rotation.

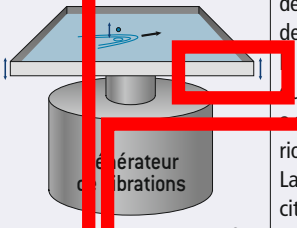
## Les mouvements circulaires quantifiés

Nous avons étudié avec Antonin Eddi et Julien Moukhtar, en 2010, le second cas en faisant tourner la cellule expérimentale. Les lois de la physique classique indiquent que la goutte-silhouette, animée d'une vitesse $V$, devrait avoir dans le repère tournant un mouvement circulaire de rayon $R = V/(2\Omega)$, où $\Omega$ est la vitesse angulaire de rotation. C'est bien ce que l'on observe pour un marcheur dont la mémoire de chemin est faible. Une mémoire faible s'obtient lorsque le forçage du système est loin du seuil de l'instabilité de Faraday. En se rapprochant

## L'expérience et l'instabilité de Faraday

Dans les expériences décrites dans cet article, une cellule contenant un petit bain d'huile de silicone 20 fois plus visqueuse que l'eau est placée sur un générateur de vibrations (fonctionnant comme un gros haut-parleur). Le liquide est soumis à une accélération verticale comprise entre [illegible] (où $g$ est l'accélération de la pesanteur) et de fréquence 80 hertz. Lorsque l'accélération dépasse 4,2 $g$, on observe que toute la surface se couvre d'un réseau d'ondes stationnaires. C'est l'instabilité de Faraday, où les ondes observées résultent d'un « forçage paramétrique » des ondes de surface. Ce qualificatif signifie que la modulation excitatrice concerne un des paramètres du système, ici la gravité effective.

Une caractéristique du forçage paramétrique (que les enfants utilisent pour augmenter l'amplitude de l'oscillation des balançoires) est que la période du mouvement excité




est doublée par rapport à la période de forçage [illegible]. On obtient une onde de surface dont la longueur d'onde $\lambda_F$ correspond à cette période.

Toutes les expériences sont réalisées avec des amplitudes de forçage inférieures au seuil de déclenchement de l'instabilité de Faraday. On dépose sur la surface oscillante des gouttes constituées du même liquide et dont le diamètre est de l'ordre de 0,7 millimètre. Pour des amplitudes de forçage supérieures à $g$, la goutte rebondit périodiquement sur la [illegible] fusionner avec celui-ci. Lorsque l'amplitude de ce forçage se rapproche de 4,2 $g$, on constate deux phénomènes. L'amplitude des rebonds devient telle que la goutte ne touche la surface qu'une période sur deux. Elle a donc désormais la même période que les ondes de Faraday. La goutte devient ainsi un excitateur local efficace qui crée des ondes circulaires stationnaires [illegible]. La goutte rebondit alors sur une protubérance de plus en plus importante.

Cette situation instable induit une mise en mouvement de la goutte. Le rebond devient asymétrique et la goutte s'autopropulse. Le temps de déclin des ondes excitées par les chocs précédents est un paramètre que contrôle la distance au seuil de l'instabilité de Faraday : typiquement, lorsqu'on applique une accélération de 3,8 $g$, le champ d'onde résulte de la superposition [illegible] bonds, alors que pour 4,16 $g$, le champ intègre la mémoire des 100 derniers chocs.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

de ce seuil, le temps de persistance des ondes croît, la mémoire du marcheur augmente et le champ d'onde devient plus complexe et plus étendu. Dans ces conditions, on constate que les rayons des orbites n'évoluent plus de façon continue : quand on augmente la vitesse de rotation, le rayon décroît par sauts entre certaines valeurs successives *(voir la figure 6)*. Ces valeurs discrètes peuvent être indexées par un entier $n = 0, 1, 2, \ldots$, le mode $n = 0$ correspondant à l'orbite la plus serrée (obtenue pour des vitesses de rotation élevées).

Ainsi, les orbites possibles de la gouttelette sont spontanément quantifiées. On peut montrer que cette quantification résulte directement de la mémoire de chemin. Le champ d'onde est ici créé par un ensemble de sources distribuées sur un cercle. Selon le diamètre de celui-ci, une force supplémentaire, radiale, apparaît. Induite par le champ d'onde, cette force ajoute une contribution centrifuge ou centripète à la force de Coriolis pour créer les niveaux discrets observés.

## Existe-t-il un lien avec la mécanique quantique ?

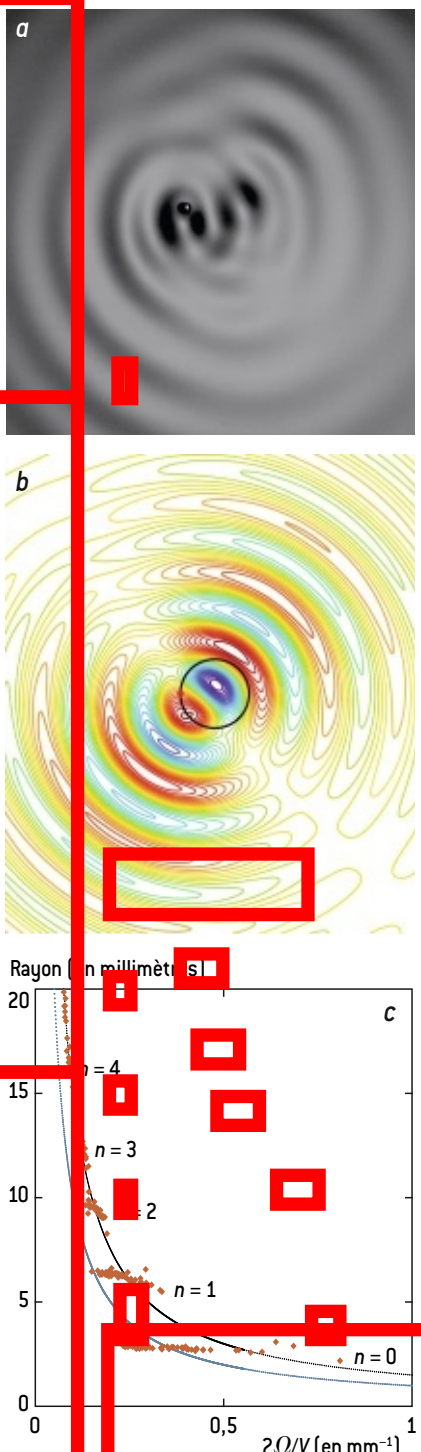
Il existe une analogie formelle entre la force de Lorentz et la force de Coriolis. Les deux forces conduisent à des mouvements orbitaux, la vitesse de rotation du plateau jouant dans le second cas un rôle similaire à la force magnétique. Par ailleurs, en mécanique quantique, on sait que la condition dite de Bohr-Sommerfeld, selon laquelle la longueur de l'orbite est un multiple de la longueur d'onde, implique que les orbites d'un électron soumis à un champ magnétique, dites orbites de Landau, soient quantifiées. On peut se demander s'il existe un lien entre la quantification de Landau et celle observée avec les gouttes.

La question peut paraître stupide puisque, dans le cas quantique, la quantification est reliée à la constante de Planck $h$ qui ne joue aucun rôle ici. Mais cette constante n'intervient que dans la détermination de la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_{dB}$. Pour cette raison, on peut exprimer les diamètres des orbites de Landau directement en fonction de $\lambda_{dB}$. De la même façon, les diamètres des orbites de marcheurs sont une fonction de la longueur d'onde de Faraday $\lambda_F$. En identifiant ces deux longueurs d'onde, $\lambda_{dB}$ et $\lambda_F$, une analogie surgit entre la quantification en mécanique quantique et celle que nous observons avec les gouttelettes.

Il y a un plaisir esthétique à faire ces expériences. Toutefois, leur intérêt tient à l'évidence à leur relation éventuelle avec la mécanique quantique. De ce point de vue, leur inconvénient est leur très grande distance avec celle-ci. La constante de Planck n'intervient pas dans notre système, qui est par ailleurs fortement dissipatif (l'énergie se dissipe et entretenu, alors que la situation quantique est non dissipative. En outre, l'onde de surface se propage sur un milieu matériel, un « éther » *a priori* absent en mécanique quantique.

Mais l'intérêt de notre expérience vient aussi principalement de cette distance avec la situation quantique. À l'échelle microscopique, la limitation de Planck s'impose à tous les phénomènes, et c'est pourquoi il est impossible d'effectuer une mesure qui ne perturbe pas radicalement l'objet à mesurer. Dans notre système, de telles mesures intrusives peuvent être également faites et produisent des résultats comparables. Ainsi, la diffraction d'un marcheur est une expérience intrusive qui revient à déterminer en aveugle la position du marcheur dans la direction perpendiculaire à son mouvement. Pour réaliser cette mesure, nous soumettons les contraints de limiter l'extension transverse de l'onde. Comme on l'a montré, cela conduit, après la mesure, à une indétermination sur la direction de la vitesse. Il s'agit là, *mutatis mutandis*, d'un équivalent classique du principe d'incertitude de Heisenberg.

Par ailleurs, notre système étant macroscopique, son interaction avec la lumière est négligeable et on peut donc l'observer de façon non intrusive. Il est en particulier possible de voir ce qui se passe durant les expériences de diffraction ou d'interférence. À chaque réalisation de l'expérience, on observe que la goutte, à proximité des fentes, suit une trajectoire compliquée. L'onde qui la guide est elle-même complexe et contient de l'information tant sur la trajectoire antérieure que sur l'environnement spatial formé par les obstacles. La situation redevient simple statistiquement : la répétition de l'expérience révèle que la probabilité de déviation dans une direction est donnée par la diffraction ou l'interférence d'une onde plane qui serait passée par les fentes. Néanmoins, cette onde plane n'est jamais visible dans une réalisation donnée *(voir la figure 4)*.




**6. LORSQU'ON FAIT TOURNER** (à une vitesse angulaire $\Omega$ réglable) la cellule contenant le liquide, le marcheur subit une force de Coriolis dans le référentiel tournant. Cette force perpendiculaire à la vitesse $V$ du marcheur lui fait décrire un mouvement circulaire *(photographie en a, simulation numérique en b)*. Lorsqu'on augmente la mémoire de chemin, les orbites dont le rayon variait continûment avec la rotation *(c, courbe noire)* deviennent discrètes *(points rouges)*. Cela provient d'une force de « quantification » due à la superposition des ondes émises le long de toute la trajectoire circulaire.

## Les théories d'ondes pilotes en mécanique quantique

Les expériences avec les « marcheurs » réalisent à échelle macroscopique le guidage d'une particule par une onde. Cette situation est proche de celle qui a été imaginée dans les modèles dits d'onde pilote de la mécanique quantique. Il convient donc de rappeler brièvement l'histoire de ces modèles dits de « de Broglie-Bohm ». Bien que toujours étudiés, ces derniers sont aujourd'hui souvent considérés comme superflus par les spécialistes de la mécanique quantique. L'évolution historique de ces modèles est complexe, mais son examen montre l'intérêt de distinguer les deux modèles respectivement proposés par Louis de Broglie et par l'Américain

Le modèle de Bohm, proposé en 1952, est actuellement le plus connu. L'onde qui est solution de l'équation de Schrödinger y joue le rôle de l'onde pilote. On peut, par une transformation mathématique, séparer cette équation en deux parties : une équation qui énonce la continuité des densités de probabilité, et une équation de mouvement qui détermine des trajectoires dans l'espace physique. Toutefois, le point de départ de cette approche étant l'équation de Schrödinger, on obtient seulement un autre aspect des ondes de probabilité. Cette approche associe des trajectoires de particules fictives à des flux de densités de probabilité. Ces particules sont ainsi soumises à un potentiel quantique, qui a pour origine la fonction de Schrödinger.

Le modèle de Bohm diffère profondément de ce qu'avait envisagé de Broglie, qui souhaitait à la fois décrire le mouvement des individuelles dans l'espace physique et pouvoir en déduire les propriétés statistiques.

Dans ses travaux de 1927 repris en 1953, de Broglie propose un modèle de double solution où coexistent deux champs d'onde. Le premier décrit le mouvement de l'objet individuel dans l'espace physique ; c'est un paquet d'ondes ayant en son centre une zone singulière caractérisée par une très grande amplitude et qui équivaut à une particule ponctuelle. Cette singularité est guidée par son paquet d'ondes, qui constitue une onde pilote, dont la dynamique de la singularité des propriétés ondulatoires qui induisent une non-localité spatiale. Ainsi, dans ce modèle, les singularités (ou particules) peuvent être par exemple déviées et donner (statistiquement) une figure de diffraction ou d'interférence. La deuxième onde considérée par de Broglie est la fonction d'onde décrite par l'équation de Schrödinger. Cette onde, qui n'est pas physique au sens classique, traduit le comportement statistique des objets individuels conformément à l'interprétation usuelle de la mécanique quantique. Elle [illegible] un comportement moyen et permet de prédire les propriétés statistiques observées.

Ces idées de de Broglie, comme [illegible] tées marginales, l'approche usuelle paraissant suffire à l'interprétation des données expérimentales.

Nos résultats expérimentaux suggèrent qu'un modèle de « double solution » du type proposé initialement par de Broglie *(voir l'encadré ci-dessus)* peut constituer la face cachée des comportements statistiques quantiques. Dans nos expériences, chaque marcheur individuel est guidé par une onde pilote. Les distributions statistiques obtenues lors de mesures intrusives font émerger des densités de présence possédant un caractère ondulatoire. Néanmoins, à l'échelle de l'expérience avec un marcheur unique cette onde de densité, qui est l'analogue de l'onde solution de l'équation de Schrödinger, n'est jamais visible directement.

## Un débat ancien qui n'est pas clos

Les observations suggèrent l'origine des propriétés statistiques des marcheurs. La dynamique due à l'existence de la mémoire de chemin tend à devenir chaotique dans tout environnement confiné, car cela induit une prolifération des sources secondaires. Le champ d'onde résultant est corrélé à la géométrie locale, dont il tend à exciter les modes propres de vibration. Des résultats préliminaires concernant les densités de probabilité de présence des marcheurs dans des cavités vont d'ailleurs dans ce sens. Ainsi, l'onde pilote peut être à l'origine d'un champ moyen reflétant la géométrie de l'environnement et commun à toutes les réalisations.

La théorie standard de la mécanique quantique, développée par l'école de Copenhague, fournit un formalisme qui permet de prédire avec précision les résultats de mesures dans une très grande variété de situations. La dualité onde-particule y joue un rôle central.

En dépit de son efficacité, cette approche probabiliste de la mécanique quantique garde un caractère singulier. À l'opposé de tous les autres phénomènes de physique statistique et de façon surprenante, elle suppose qu'aucun mécanisme sous-jacent, même complexe, ne peut intervenir au niveau d'une particule individuelle et être responsable de ces comportements probabilistes. C'est précisément ce point d'achoppement qui faisait penser à de Broglie ou Einstein que la théorie quantique était fondamentalement incomplète.

Or il semble qu'aucune approche de la mécanique quantique n'ait envisagé un effet de mémoire. Comme nous l'avons vu, celui-ci induit dans le cas de nos marcheurs une non-localité spatio-temporelle qui est à l'origine d'un principe d'incertitude et d'une quantification. C'est pourquoi nous pensons que le débat ancien sur le caractère incomplet de la mécanique quantique dans son interprétation actuelle n'est pas clos.

### BIBLIOGRAPHIE


A. Eddi *et al.*, **Information stored in Faraday waves : the origin of a path memory**, *J. Fluid Mech.*, vol. 674, pp. 433-463, 2011.

E. Fort *et al.*, **Path-memory induced quantization of classical orbits**, *PNAS*, vol. 107, pp. 17515-17520, 2010.

Y. Couder et E. Fort, **Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 154101, 2006.

S. Protière *et al.*, **Particle-wave association on a fluid interface**, *J. Fluid Mech.*, vol. 554, pp. 85-108, 2006.

Y. Couder *et al.*, **Walking and orbiting droplets**, *Nature*, vol. 437, p. 208, 2005.

L. de Broglie, **L'interprétation de la mécanique ondulatoire**, *J. de Phys. et le radium*, tome 20, pp. 963-978, 1959.

L. de Broglie, **La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement**, *J. de Phys. et le radium*, série 6, tome 8, pp. 225-241, 1927.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

cnrs
www.cnrs.fr

cea
énergie atomique • énergies alternatives

BASF
The Chemical Company

THALES

UIC

MAIRIE DE PARIS

syctom
l'agence métropolitaine des déchets ménagers

casden
BANQUE POPULAIRE

rfi

Le Point

POUR LA SCIENCE

Direct Matin

mc2
machineétudiante

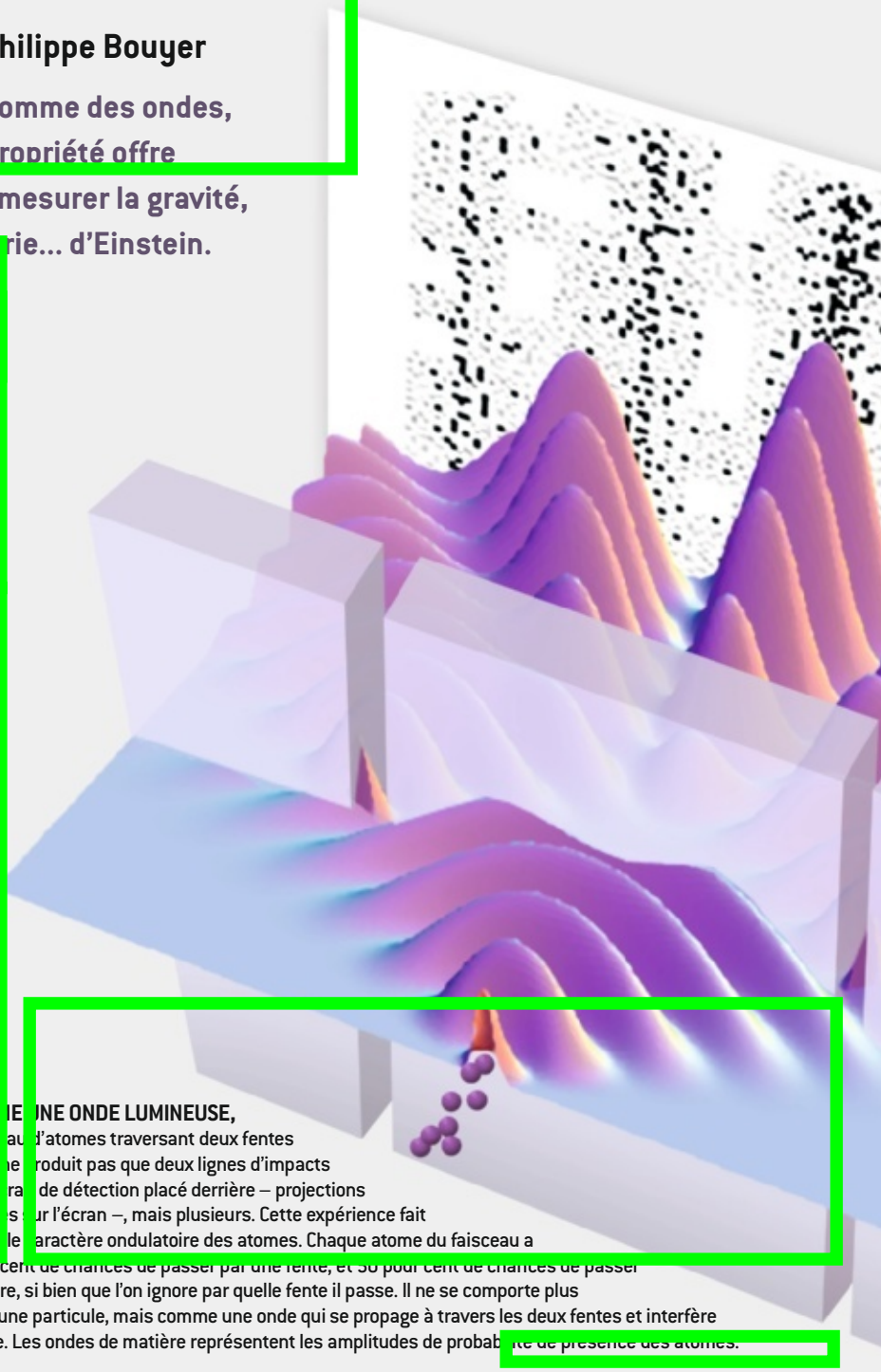
# Des ondes de matière pour tester les lois de l'Univers

**Remi Geiger, Vincent Ménoret et Philippe Bouyer**

**Les atomes se comportent parfois comme des ondes, que l'on peut faire interférer. Cette propriété offre de nouveaux outils plus précis pour mesurer la gravité, se repérer en vol ou éprouver la théorie... d'Einstein.**

La matière est une onde et les ondes sont composées de particules (photons pour la lumière, phonons pour le son) : c'est un des principes clefs de la mécanique quantique. Il prédit qu'à toute particule on peut associer une onde, et réciproquement. Ainsi, de même qu'on peut faire interférer des photons, mettant ainsi en évidence leur caractère ondulatoire, il est possible de réaliser des interféromètres avec des particules de matière.

Les physiciens américains Clinton Davisson et Lester Germer en ont fait la première démonstration en 1927 en reproduisant avec des électrons l'expérience des fentes de Young : un faisceau d'électrons est dirigé vers deux fentes très fines et très rapprochées. Derrière les fentes, un détecteur enregistre les points d'impact des électrons. Dans le cas de corpuscules, on s'attendrait à observer l'image des deux fentes sur l'écran, c'est-à-dire deux lignes. Or on obtient un tout autre résultat. Les impacts se répartissent selon un motif périodique – un interférogramme –, qui ne peut s'expliquer que par un phénomène d'interférences, et donc un comportement ondulatoire des électrons *(voir la figure 1)*. Depuis cette preuve de principe, des interférences ont été observées avec des neutrons, des atomes et, récemment, des molécules organiques comportant plusieurs centaines d'atomes, confirmant que la mécanique quantique est encore valable à l'échelle macroscopique.



**1. COMME UNE ONDE LUMINEUSE,** un faisceau d'atomes traversant deux fentes étroites ne produit pas que deux lignes d'impacts sur un écran de détection placé derrière – projections des fentes sur l'écran –, mais plusieurs. Cette expérience fait ressortir le caractère ondulatoire des atomes. Chaque atome du faisceau a 50 pour cent de chances de passer par une fente, et 50 pour cent de chances de passer par l'autre, si bien que l'on ignore par quelle fente il passe. Il ne se comporte plus comme une particule, mais comme une onde qui se propage à travers les deux fentes et interfère en sortie. Les ondes de matière représentent les amplitudes de probabilité de présence des atomes.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Cependant, mettre en évidence le comportement ondulatoire de la matière n'est pas chose aisée. Dans les conditions habituelles, la longueur d'onde associée aux particules – la longueur d'onde de de Broglie, inversement proportionnelle à la vitesse et à la masse de la particule – est très faible (environ 0,1 nanomètre pour un atome d'hélium se déplaçant à une vitesse de 1 000 mètres par seconde). À une telle longueur d'onde, les phénomènes ondulatoires – les figures d'interférences – sont tellement faibles qu'ils sont masqués par le comportement corpusculaire.

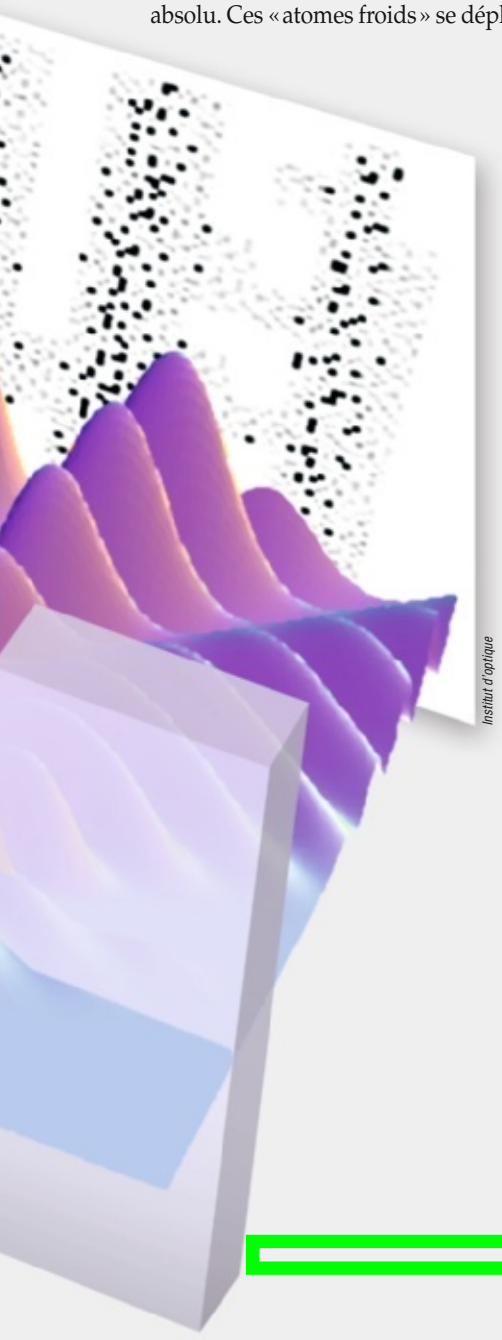
Depuis près de 25 ans, on refroidit des gaz d'atomes à des températures extrêmement basses, de l'ordre de quelques millionièmes de degré au-dessus du zéro absolu. Ces « atomes froids » se déplaçant lentement ont leur longueur d'onde de de Broglie augmente, et les interférences deviennent détectables. Loin d'être une simple curiosité quantique, ces ondes de matière ont de nombreuses applications, à la fois parce qu'elles sont de formidables outils pour sonder la matière à l'échelle atomique, et parce qu'elles permettent de concevoir des instruments de mesure d'une grande précision, telles des horloges atomiques qui mesurent la seconde avec 17 chiffres significatifs.

Un des principaux champs d'application des interféromètres à atomes froids, ou interféromètres atomiques, est la réalisation de senseurs inertiels, qui mesurent des accélérations ou des rotations. Depuis quelques années, les applications de ces senseurs se multiplient, dans des champs aussi variés que la mesure des variations de la gravité terrestre en fonction des marées, la navigation ou la vérification, avec une précision inégalée, de questions de physique fondamentale, tel le principe d'équivalence d'Einstein. Avant de nous intéresser à ces diverses applications, examinons le principe de fonctionnement d'un senseur inertiel.

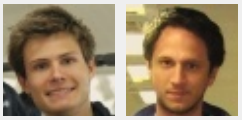
## Des interférences avec des atomes

En optique et, plus généralement, en mécanique ondulatoire, on parle d'interférences lorsque deux ondes lumineuses de même type se rencontrent et interagissent après avoir parcouru des chemins différents. Un raisonnement mathématique simple permet de comprendre ce que représente une figure d'interférences détectée sur un écran en sortie d'un interféromètre optique.

Une onde (électromagnétique dans le cas de la lumière) peut être modélisée par une amplitude qui oscille au fil du temps. La superposition de deux ondes est alors la somme des amplitudes de chaque onde. Les détecteurs (y compris notre œil ou l'écran), cependant, ne sont sensibles qu'à l'intensité lumineuse de l'onde, c'est-à-dire au module au carré de son amplitude. L'intensité lumineuse détectée lors de la superposition de deux ondes est ainsi le module au carré de la somme des amplitudes des deux ondes, soit la somme des intensités des deux ondes, à laquelle s'ajoute un terme dit d'interférences : le produit des amplitudes des deux ondes. Si les ondes oscillent en phase, ce terme est maximal, et les interférences sont dites constructives :


Institut d'optique


LES AUTEURS



Rémi GEIGER, docteur de l'Université Paris Sud, vient de terminer sa thèse au Laboratoire Charles Fabry (UMR 8501, CNRS, Université Paris Sud, Institut d'optique), à Palaiseau, où Vincent MÉNORET est doctorant de la même université.

Philippe BOUYER est directeur du Laboratoire photonique, numérique et nanosciences (UMR 5298, CNRS, Université de Bordeaux I, Institut d'optique), à Talence.


## L'ESSENTIEL

- ✔ Selon la physique quantique, les particules de matière sont aussi des ondes.
- ✔ Les physiciens ont mis au point des dispositifs où ces ondes de matière interfèrent.
- ✔ À géométrie équivalente, ces interféromètres atomiques sont 100 milliards de fois plus sensibles que les dispositifs optiques.
- ✔ Les applications sont nombreuses : mesurer les variations de gravité, sonder le sous-sol, se diriger par navigation inertielle...
- ✔ Un des grands enjeux est la vérification du principe d'équivalence d'Einstein à l'échelle quantique.

l'intensité lumineuse résultante est supérieure à la somme des intensités des deux ondes. Si les ondes oscillent en opposition de phase, le terme d'interférences est minimal, et les interférences sont dites destructives : l'intensité lumineuse résultante est inférieure à la somme des intensités des deux ondes. Ce calcul est effectué en chaque point de l'écran, et l'on obtient des motifs périodiques clairs et sombres – les franges d'interférences.

Pour réaliser un interféromètre atomique, on utilise, comme avec la lumière, des lames séparatrices afin de diviser une onde de matière en deux ondes identiques qui parcourront des chemins différents. Ces lames séparatrices sont réalisées à l'aide d'un réseau de fentes microscopiques ou grâce à la manipulation des atomes par laser *(voir l'encadré ci-contre)*. Les franges d'interférences à la sortie de l'interféromètre révèlent les différences de parcours des deux ondes : un chemin plus long pour l'une que pour l'autre, une interaction avec un obstacle pour l'une et non pour l'autre, etc.

Pour les ondes de matière, ces différences, même infimes, peuvent avoir un effet considérable. Si, dans un interféromètre lumineux, les ondes voyagent à la vitesse de la lumière, les ondes atomiques, bien plus lentes, passent beaucoup plus de temps dans l'interféromètre. Par conséquent, à géométrie équivalente, les dispositifs à interférences atomiques sont jusqu'à 100 milliards de fois plus sensibles aux éventuelles interactions auxquelles les atomes sont soumis que les dispositifs optiques. On met alors à profit cette sensibilité exceptionnelle pour mesurer avec une grande précision, par exemple, l'effet d'un champ électrique sur un atome, la masse d'un atome, ou encore la rotation ou l'accélération subies par l'interféromètre, qui devient alors un senseur inertiel ultrasensible.

Une des premières applications de ces senseurs inertiels est la mesure de l'accélération verticale subie par les atomes sous l'effet de la pesanteur. L'interféromètre à onde de matière devient alors un gravimètre atomique, puisqu'il détecte les infimes fluctuations de l'accélération de la pesanteur *(g)* dues aux marées, sont quelques dizaines de milliardièmes de *g*. Les applications de tels gravimètres sont nombreuses. Cartographier le champ de pesanteur permet d'obtenir des informations indirectes sur la composition de la croûte terrestre ou une nappe de pétrole, par exemple, auront des densités différentes et contribueront à des valeurs mesurées de *g* légèrement différentes en surface ; de telles mesures locales de *g* pourraient ainsi faciliter la prospection minière et pétrolière.

De même, en plaçant un gravimètre sur le flanc d'un volcan, on peut surveiller son activité : si des poches de magma se forment ou disparaissent près de la surface, *g* est modifié. Enfin, les gravimètres atomiques peuvent enregistrer l'activité sismique du lieu où ils sont positionnés (déplacement des plaques tectoniques lors d'un séisme, montée de magma liée à une éruption volcanique, mouvements de l'interféromètre liés aux vibrations d'un séisme) et ainsi contribuer à une meilleure compréhension des séismes, voire, peut-être un jour, à leur prévision.

## ISOLÉS DES FROTTEMENTS DE L'AIR

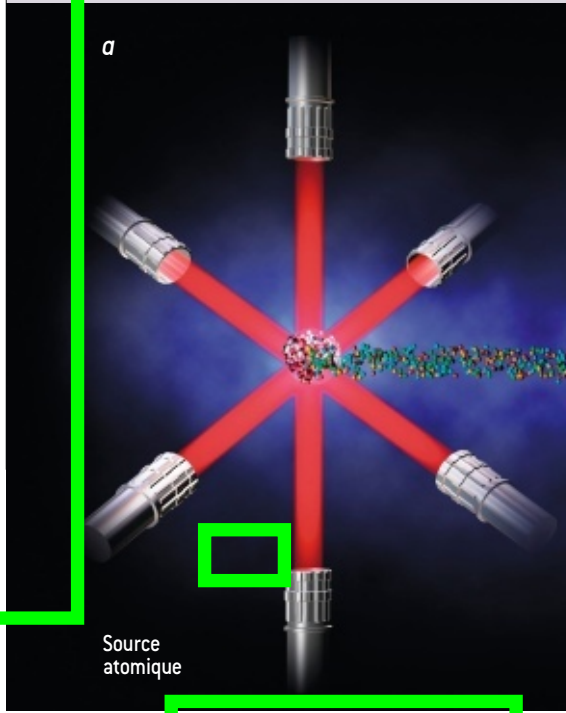
**dans leur enceinte à vide, les atomes suivent une trajectoire parfaitement balistique déterminée par les lois de Newton**

## Se diriger grâce aux atomes

Les interféromètres à onde de matière sont aussi de formidables outils pour le guidage et la navigation inertielle. Pour se positionner dans l'espace, et ainsi se diriger d'un point de départ vers une destination précise, les navigateurs se sont toujours référés à des objets dont la position est par ailleurs connue (un référentiel). L'utilisation du sextant, par exemple, s'appuie sur la position des étoiles et des astres naturels, et le GPS sur celle de satellites artificiels. Sans ces références extérieures, la navigation repose sur une estimation de la direction et de la vitesse de déplacement, et toute imprécision conduit à une erreur sur la destination. La navigation inertielle offre une bonne estimation de ces paramètres, à condition que les appareils utilisés – des accéléromètres et des gyroscopes – évitent toute erreur de mesure.

On embarque à bord du véhicule (avion, sous-marin, bateau…) un ensemble de gyromètres et d'accéléromètres. À partir de l'enregistrement de l'accélération et de la rotation du véhicule au cours du temps, on calcule sa vitesse (en multipliant l'accélération mesurée par le temps entre deux mesures, c'est-à-dire en intégrant le signal d'accélération sur cette durée), puis on remonte à la position en intégrant une seconde fois le signal de vitesse. Cette méthode, très efficace, a un inconvénient majeur : toute erreur de mesure, ou toute dérive des appareils, donne une position fausse du véhicule. Avec les instruments actuels, les erreurs liées à l'inexactitude des instruments se traduisent parfois par des positions erronées de plusieurs dizaines de mètres au bout de quelques minutes.

Un senseur inertiel atomique mesure des accélérations et rotations infimes en provoquant et analysant les interférences d'un faisceau d'atomes froids soumis à ces forces inertielles. Des atomes sont refroidis par laser à une température de un microkelvin *(a)*, puis libérés du piège. Un laser prépare les atomes dans un état quantique pur *(b)*. En utilisant une impulsion lumineuse appropriée réalisée à l'aide d'une onde laser stationnaire (un faisceau laser rétroréfléchi, caractérisé par des franges – des ventres), on fait passer un atome de l'état quantique initial (où l'atome a une vitesse *v*) à une superposition de deux états quantiques différents :






© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Les senseurs inertiels à ondes de matière ne sont pas concernés par ces limitations : isolés des frottements de l'air dans leur enceinte à vide, les atomes suivent une trajectoire balistique déterminée par les lois de Newton. Avec l'interféromètre atomique, on évite ainsi les erreurs et dérives des systèmes classiques : la trajectoire des atomes étant connue, on détecte les mouvements du véhicule en mesurant le déplacement de l'interféromètre par rapport aux atomes.

En pratique, ce n'est pas aussi simple. Réaliser une telle centrale inertielle atomique transportable reste un défi : occupant une pièce entière, ces expériences nécessitent des conditions thermiques d'une grande stabilité. De plus, l'interféromètre atomique est si sensible qu'en présence de vibrations, comme dans un avion de ligne, il est impossible d'extraire une information précise sur l'accélération. Déjà en laboratoire, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs d'amortissement perfectionnés. Comment dans ces conditions, utiliser les ondes de matière pour guider un sous-marin ou un avion ?

Depuis quelques années, les progrès dans la technologie des composants (en particulier des systèmes laser) et dans la compréhension des phénomènes physiques en jeu permettent de sortir les interféromètres de leur cocon. Plusieurs prototypes de gravimètres déplaçables ont vu le jour permettant de mesurer la gravité à des endroits différents et de participer à des campagnes de comparaison dans des observatoires de géophysique.

## ✔ BIBLIOGRAPHIE


R. Geiger *et al.*, **Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry**, *Nature Communications*, vol. 2, article n° 474, doi : 10.1038/ncomms1479, 2011.

Ch. Salomon, **Mesurer le temps avec des atomes**, *Pour la Science*, n° 397, pp. 28-29, 2010.

**La lumière dans tous ses états**, *Dossier Pour la Science*, n°53, 2006.

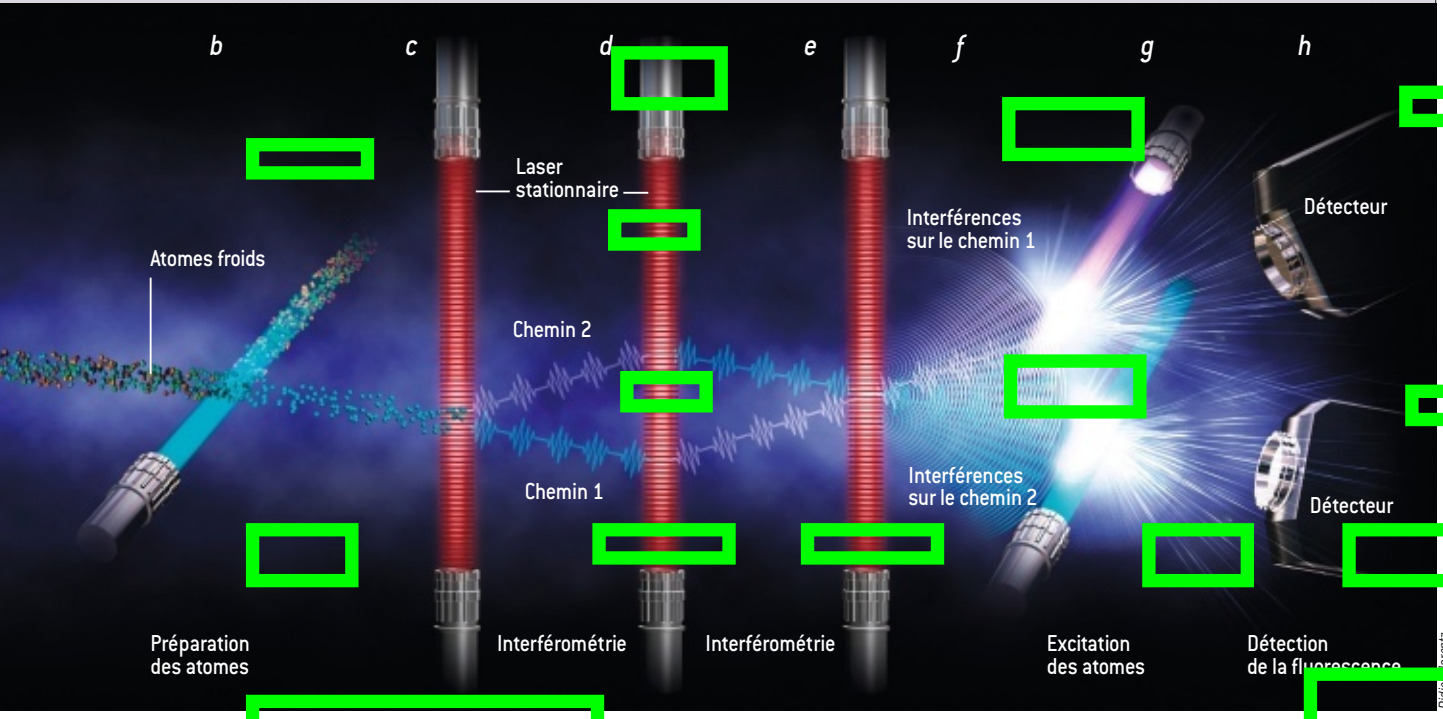
**Les sites Internet des projets d'interférométrie atomique en microgravité :**
www.ice-space.fr
www.miniatom.fr

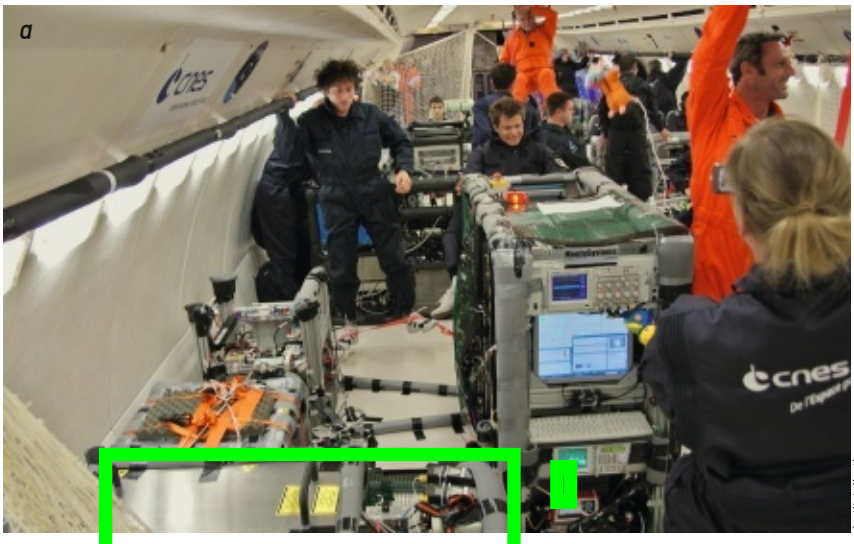

## PRINCIPE D'UN SENSEUR INERTIEL ATOMIQUE

le premier correspond à l'état initial de vitesse *v*, l'autre à l'état où l'atome a absorbé un photon – ce « choc » modifiant la vitesse de l'atome d'une quantité proportionnelle à l'énergie du photon *(c)*. De cette superposition d'états quantiques résulte un dédoublement de l'onde de matière initiale en deux ondes atomiques qui se propagent dans des directions différentes. Une deuxième impulsion lumineuse inverse les états quantiques et les vitesses des deux ondes atomiques sans les dédoubler (*d*). Enfin, une troisième et dernière impulsion dédouble à nouveau dans les deux états quantiques chacune des deux ondes, et les recombine *(e)* : les ondes de même état quantique interfèrent alors *(f)*, et l'on obtient un interféromètre atomique.

Les deux faisceaux d'atomes sortants sont excités chacun par un faisceau laser sonde *(g)*, et deux détecteurs *(h)* collectent la fluorescence émise. On compte ainsi le nombre d'atomes dans chaque bras de sortie de l'interféromètre. Le rapport de ces deux nombres donne un point sur une courbe – une sinusoïde dont la périodicité correspond à celle des nœuds de l'onde stationnaire. Cette courbe et la position du point sur la courbe est liée à la différence des chemins parcourus par les ondes atomiques, notamment du fait de la gravité.

En d'autres termes, la position de ce point varie en fonction de celle des atomes par rapport aux nœuds de l'onde stationnaire qu'ils ont traversée lors des impulsions : les nœuds constituent en quelque sorte une règle graduée sur laquelle on repère la position des atomes et, à chaque impulsion, le laser stationnaire imprime cette position sur l'onde atomique sous la forme d'un déphasage, qui s'ajoute à ceux donnés par les impulsions précédentes. Ainsi, à l'issue de deux impulsions, on mesurerait la vitesse des atomes ; avec trois impulsions, on mesure directement l'accélération subie par les atomes sous l'effet de la pesanteur.

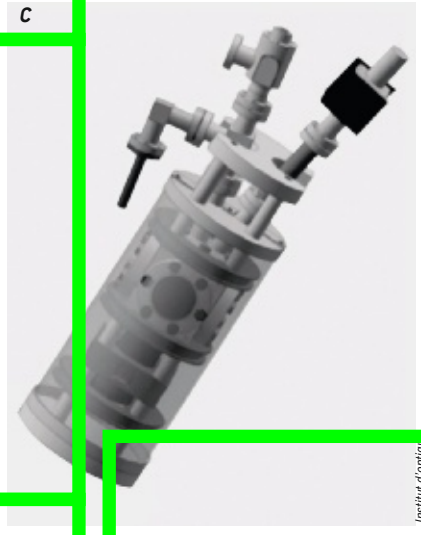





Après des premiers tests réalisés dans un camion (à Stanford aux États-Unis), un senseur inertiel atomique vient d'être utilisé pour la première fois pour enregistrer en continu l'accélération d'un avion en vol. Pour s'affranchir en partie de l'incertitude de mesure liée aux vibrations, nous avons combiné un accéléromètre atomique et des accéléromètres mécaniques. Si la mesure de l'interféromètre est très précise au sein d'une frange d'interférences, permettant de lire très finement la valeur de l'accélération des atomes sur cette frange, il est impossible de savoir sur quelle frange est faite la mesure si les vibrations sont trop importantes. L'accéléromètre mécanique joue le rôle de la graduation grossière d'un vernier ou d'un pied à coulisse : il permet de retrouver la frange d'interférences sur laquelle opère l'interféromètre.

Un tel senseur hybride, développé au prix d'un grand nombre d'innovations technologiques, a permis de mesurer l'accélération d'un avion avec une précision relative d'un trois centième (ce qui est excellent) et montré qu'il est possible d'améliorer les performances des accéléromètres embarqués usuels en les faisant fonctionner conjointement avec l'interféromètre atomique. Ce nouveau type de senseur devrait permettre de réaliser d'ici quelques années des systèmes de navigation inertielle mesurant toutes les composantes d'accélération et de rotation sans dérive.

Comprendre l'infiniment grand grâce à l'infiniment petit, tel est aujourd'hui un des autres défis de l'interférométrie à ondes de matière. En particulier, le principe d'équivalence d'Einstein – ou d'universalité de la chute libre – est-il toujours valide à l'échelle quantique ? Ce principe est la pierre angulaire de la théorie de la relativité générale d'Einstein : il stipule que la masse d'un objet quelconque n'a pas de rôle dans son mouvement autour d'un astre ou, ce qui revient au même, que tous les objets tombent avec la même vitesse dans le vide (en l'absence de frottements de l'air) lorsqu'ils sont soumis à la pesanteur, quelles que soient leur masse ou leur composition interne.




**2. L'EXPÉRIENCE EMBARQUÉE** dans l'*Airbus* ZERO-G pour tester le principe d'équivalence occupe une bonne partie de l'avion *(a)*. Les physiciens travaillent à la rendre plus compacte *(b)*, leur objectif étant de la contenir dans un boîtier transportable de la taille d'une malle *(c)*, afin de l'envoyer dans l'espace à bord d'un satellite.

## Tester le principe d'équivalence

Ce postulat emblématique a toujours fasciné les scientifiques, de Galilée faisant chuter deux objets du haut de la tour de Pise à l'astronaute américain David Scott qui, lors de la mission *Apollo 15*, lâcha simultanément une plume et un marteau pour constater que les deux objets arrivaient au même moment sur le sol lunaire. Cette loi fondamentale a conduit Einstein à reformuler les lois de la gravitation de Newton : la théorie de la relativité générale, fruit de cette reformulation, jouit d'un succès incontestable depuis près d'un siècle, tant par les vérifications expérimentales de ses prédictions que par son élégance mathématique. Elle constitue un élément essentiel, par exemple, dans l'analyse des signaux de géolocalisation par GPS.

Cependant, cette théorie est aujourd'hui remise en question lorsque l'on essaye de combiner les propriétés de l'infiniment grand, à l'échelle de l'Univers où la gravitation joue un rôle majeur, et celles de l'infiniment petit, à l'échelle de l'atome où la description quantique prédomine. L'enjeu majeur de cette recherche est la compréhension des premiers instants de l'Univers, où des forces de gravitation intenses agissaient sur des échelles infiniment petites.

La théorie des cordes et de la gravitation quantique, construite pour unifier la théorie d'Einstein et la physique quantique, prévoit d'infimes déviations à l'universalité de la chute libre et, pour éprouver ce principe, des mesures ultraprécises sont nécessaires. Le test le plus précis compare aujourd'hui l'accélération de la Terre et de la Lune (de masse et de composition très différentes) soumises au champ de gravité du Soleil, en mesurant la distance Terre-Lune à l'aide d'un laser avec une précision de un centimètre. Sur Terre, des balances de torsion comparent l'effet de


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

7E SALON DU LIVRE D'HISTOIRE
DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

# L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT

© FOTOLIA

TABLES RONDES, RENCONTRES AVEC DES AUTEURS, LIBRAIRIE, EXPOSITIONS, ANIMATIONS, SPECTACLES

**18/19/20 NOVEMBRE 2011 - ESPACE ROBESPIERRE**

asts

IVRY s/SEINE

www.ivry94.fr et www.asts.asso.fr

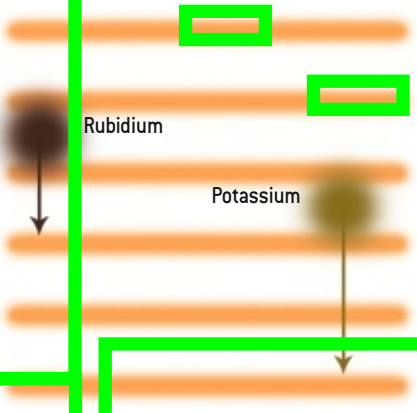
l'accélération de la pesanteur sur différents objets (telles des masses de béryllium ou de titane) avec des précisions qui reviendraient à départager deux coureurs de 100 mètres par un écart inférieur à la taille d'un atome sur la ligne d'arrivée. Dans l'espace, une mission satellite, MICROSCOPE, devrait même augmenter la précision de toutes ces mesures d'un facteur 100 en 2015.

Les interféromètres à ondes de matières pourraient aller encore plus loin ; en augmentant la précision des mesures, mais aussi en permettant de tester le principe d'équivalence avec des objets quantiques – des atomes –, au lieu des corps astronomiques ou macroscopiques utilisés aujourd'hui. L'idée est de reproduire l'expérience de chute libre de la plume et du marteau avec deux atomes différents, dont on comparerait les accélérations grâce à un interféromètre atomique. Mais il faut pour cela « gagner du temps », c'est-à-dire allonger suffisamment le temps de chute libre des atomes pour augmenter les chances de déceler une différence. Sur Terre, cette durée est limitée, car les atomes sortent de l'enceinte à vide de l'interféromètre à cause de la pesanteur. Une solution consiste à placer tout le dispositif expérimental en chute libre ou en impesanteur à bord d'un satellite.

D'impressionnants « ascenseurs », telle la tour de chute libre de Brême, en Allemagne, devraient bientôt permettre les premières mesures en chute libre sur Terre. STE-QUEST, un projet du programme *Cosmic Vision* de l'Agence spatiale européenne, a aussi été lancé pour effectuer un test complet du principe d'équivalence d'Einstein en embarquant accéléromètre et horloges atomiques dans l'espace. Associée à des chercheurs de l'Observatoire de Paris et de l'ONERA, notre équipe de l'Institut d'optique constitue la partie française de cette mission. Elle réalise une première version de l'expérience en microgravité à bord de l'*Airbus* ZERO-G de la Société *Novespace* – un avion de ligne effectuant des vols paraboliques.

Le principe de l'expérience est simple. Un satellite en orbite n'est soumis qu'à la seule force de gravitation de la Terre. À l'intérieur on mesurera à l'aide d'un double interféromètre atomique l'accélération relative de deux atomes différents (potassium et rubidium) par rapport au référentiel de l'expérience. Ce référentiel est donné par la position des nœuds de l'onde laser stationnaire qui sonde les atomes, fixée par le dispositif expérimental *(voir la figure 3)*. L'expérience permettrait de détecter si un des deux atomes est soumis à une accélération plus importante : le principe d'équivalence serait alors violé.

L'expérience en microgravité à bord de l'*Airbus* ZERO-G constitue une première étape. Cet avion effectue des vols paraboliques reproduisant pendant une vingtaine de secondes la trajectoire d'un satellite. La première phase de la manœuvre, qui dure environ 20 secondes, consiste à cabrer l'avion jusqu'à une assiette de 45 degrés avant de « l'injecter » en parabole. Lors de cette phase, la trajectoire de l'avion est fortement courbée, de sorte que les expérimentateurs à bord ressentent une force centrifuge égale à deux fois leur poids (accélération verticale égale à $2g$). Vient ensuite la parabole : pendant 22 secondes, tous les objets et expérimentateurs à l'intérieur de la cabine sont dans des conditions d'impesanteur. Lorsque l'appareil atteint 45 degrés de piqué, les pilotes redressent l'appareil, ce qui se traduit par une nouvelle phase d'hypergravité ($2g$). L'ensemble de la manœuvre est répété 31 fois pendant le vol.




**3. POUR TESTER LE PRINCIPE** d'équivalence d'Einstein à l'échelle quantique, les physiciens envisagent de mesurer la différence d'accélération d'un atome de rubidium et d'un atome de potassium en chute libre à l'aide de deux interféromètres atomiques embarqués dans un satellite. Chaque interféromètre mesurera l'accélération d'un type d'atome. La position des nœuds et des ventres *(en orange)* des ondes laser stationnaires étant fixée et identique pour les deux interféromètres, ces ondes constituent une sorte de règle graduée qui permet de repérer les éventuelles différences d'accélération entre les deux types d'atomes.

L'objectif de notre expérience est de comparer l'accélération ressentie par des atomes de rubidium et de potassium avec une précision égale à un cent milliardième de $g$. Nous avons récemment réussi, pour la première fois, à faire fonctionner un interféromètre atomique en impesanteur, ce qui constitue une étape importante pour la réussite du futur projet spatial. Nos collaborateurs de l'Université de Hanovre, quant à eux, ont effectué une expérience dans une tour de chute de 110 mètres de haut, dans laquelle ils ont suivi l'évolution d'une onde de matière géante ultrafroide pendant une seconde. Un argument supplémentaire en faveur de la nécessité d'un test du principe d'équivalence dans l'espace avec des

## Sonder la matière

Nombre d'autres projets de perfectionnement ou d'utilisation des interféromètres atomiques voient le jour actuellement, notamment grâce à la recherche fondamentale. Par exemple, de nouveaux états quantiques dits « comprimés » obtenus en laboratoire pourraient permettre d'augmenter la précision des interféromètres atomiques : lors de l'étape de préparation des atomes, il est possible de les placer dans un état quantique où plusieurs particules sont corrélées, ce qui réduit l'incertitude sur la mesure du nombre de particules à la sortie de l'interféromètre. Ces états quantiques « comprimés » permettraient de distinguer des effets inertiels jusque 1 000 fois plus petits que ceux détectés à partir d'un état quantique simple.

Une autre piste vise à utiliser les connaissances sur le comportement des ondes atomiques pour sonder la matière à l'échelle microscopique. Pour étudier le transport de l'électricité dans un solide, par exemple, et repérer la présence de défauts susceptibles de le bloquer, on décrit les électrons comme des ondes qui interfèrent quand ils ont heurté les défauts : les interférences destructives confinent les électrons, ce qui peut rendre le matériau isolant. Ce système est difficile à étudier expérimentalement. Aussi cherchons-nous à le simuler avec un gaz d'atomes froids (qui jouent le rôle des électrons) dans un potentiel lumineux désordonné (les défauts et les [illegible] terférences destructives.

L'interférométrie atomique n'en est qu'à ses débuts [illegible]


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

## et voguez vers de nouveaux horizons !

**Pour la Science** (12 n°s)
**+ Dossier Pour la Science** (4 n°s)

**1 an = 76 €**
au lieu de ~~102,50 €~~

**Vos avantages abonné :**
- ✔ 26% d'économie
- ✔ la garantie de ne manquer aucune parution
- ✔ l'accès gratuit à vos numéros en version numérique sur www.pourlascience.fr

# BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

### ❶ Je choisis mon offre :

❑ **Oui, je m'abonne 1 an et reçois 12 n°s de *Pour la Science* + 4 n°s des *Dossiers Pour la Science* au prix de 76 €***
(au lieu de ~~102,50 €~~, prix de vente au numéro). Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr

➜ Offre disponible aussi en ligne sur **www.pourlascience.fr/pls/abonnements-couples-papier**

* Tarif valable en France métropolitaine et d'Outre mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 16 € - autres pays 35 €.

❑ **Je préfère régler mon abonnement par prélèvement 19 € par trimestre****. En cadeau, je reçois le *Dossier Pour la Science* n° 64 « Exoplanètes ».**

** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment par simple courrier.

**Numéro offert**
**avec mon abonnement 19 € par trimestre**

### ❷ J'indique mes coordonnées

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

❑ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante : _____@_____

### ❸ Je choisis mon règlement

❑ Je règle en une seule fois 76 € (+ frais de port en sus pour l'étranger)

❑ par chèque à l'ordre de Pour la Science ❑ par carte bancaire N° : _____ Expire fin : _____

Signature obligatoire :

❑ Je règle en douceur **19 € par trimestre et reçois en cadeau le *Dossier Pour la Science* n° 64.** Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous et en joignant impérativement 1 RIB.

**Autorisation de prélèvement**

J'autorise *Pour la Science* à me faire une demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

**Titulaire du compte à débiter**

Nom, Prénom : _____

N° : _____ Rue : _____

CP : _____ Ville : _____

**Établissement teneur du compte à débiter**

Établissement : _____

N° : _____ Rue : _____

CP : _____ Ville : _____

**Compte à débiter**

Établissement | Code guichet | N° de compte | Clé RIB

**Date et signature (obligatoire)**

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

PLS409 – Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.12.2011

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 du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des messages d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ❑.

# Des ondes de spin pour l'électronique

M. Cazayous, Y. Gallais et A. Sacuto

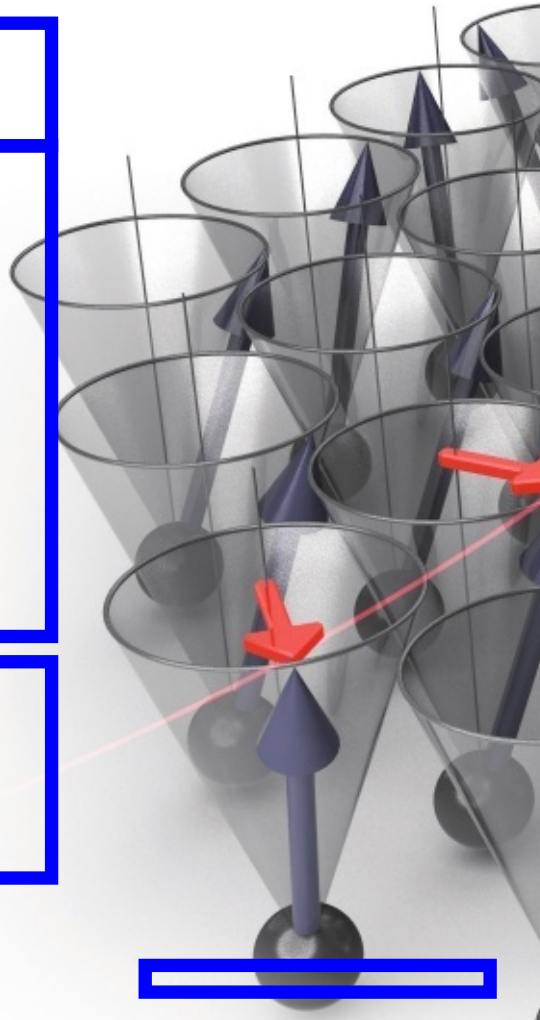
**En changeant d'orientation de proche en proche, les spins des électrons peuvent former des ondes. La magnonique, nouvelle électronique fondée sur ces ondes, pourrait conduire à une miniaturisation plus poussée.**

L'écriture, la conservation et la transmission des informations ont toujours bénéficié des derniers progrès techniques, de la presse de Gutenberg aux microprocesseurs électroniques. De nos jours, la plupart des composants électroniques sont constitués de matériaux semiconducteurs et tirent leurs fonctionnalités du contrôle des courants électriques, c'est-à-dire du déplacement des charges électriques portées par les électrons.

Toutefois, les mémoires les plus performantes – les mémoires MRAM *(Magnetic Random Access Memory)* – déjà présentes dans les ordinateurs, les téléphones mobiles ou les tablettes tactiles, utilisent une autre caractéristique de l'électron : son spin, assimilable à un petit aimant élémentaire. Ces mémoires MRAM relèvent d'un type d'électronique nommé spintronique. Aujourd'hui, les physiciens annoncent la « magnonique », une électronique fondée non plus sur les spins des électrons considérés isolément, mais sur les ondes formées par des ensembles de spins *(voir la figure 1)*.

Qu'est-ce que le spin ? Que sont les ondes de spin ? Pourquoi sont-elles intéressantes ? Comment les créer et les manipuler ? Nous allons répondre successivement à ces questions, et nous mentionnerons quelques découvertes récentes en magnonique et les perspectives qu'elles ouvrent.

Outre une charge électrique et une masse, l'électron a un moment cinétique intrinsèque nommé spin, auquel est associé un moment magnétique. C'est une grandeur qui ne peut se comprendre que dans le cadre de la physique quantique. Cependant, une image classique répandue consiste à assimiler le spin d'un électron à la rotation de ce dernier sur lui-même : l'électron ressemble ainsi à une minuscule toupie. L'axe et le sens de rotation déterminent l'orientation du spin. Toutefois, les lois de la physique quantique montrent que la mesure d'une composante du spin ne donne que certaines valeurs, selon des règles bien définies. En particulier, en projection sur



**1. LES ONDES DE SPIN** apparaissent dans des matériaux magnétiques ordonnés, où les atomes ont un spin, similaire à un petit aimant, qui tourne en décrivant un cône dit de précession. Chaque spin est en interaction quantique avec les spins voisins. Quand l'un est modifié, ses voisins le sont aussi. Les mouvements des spins se propagent ainsi de proche en proche.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

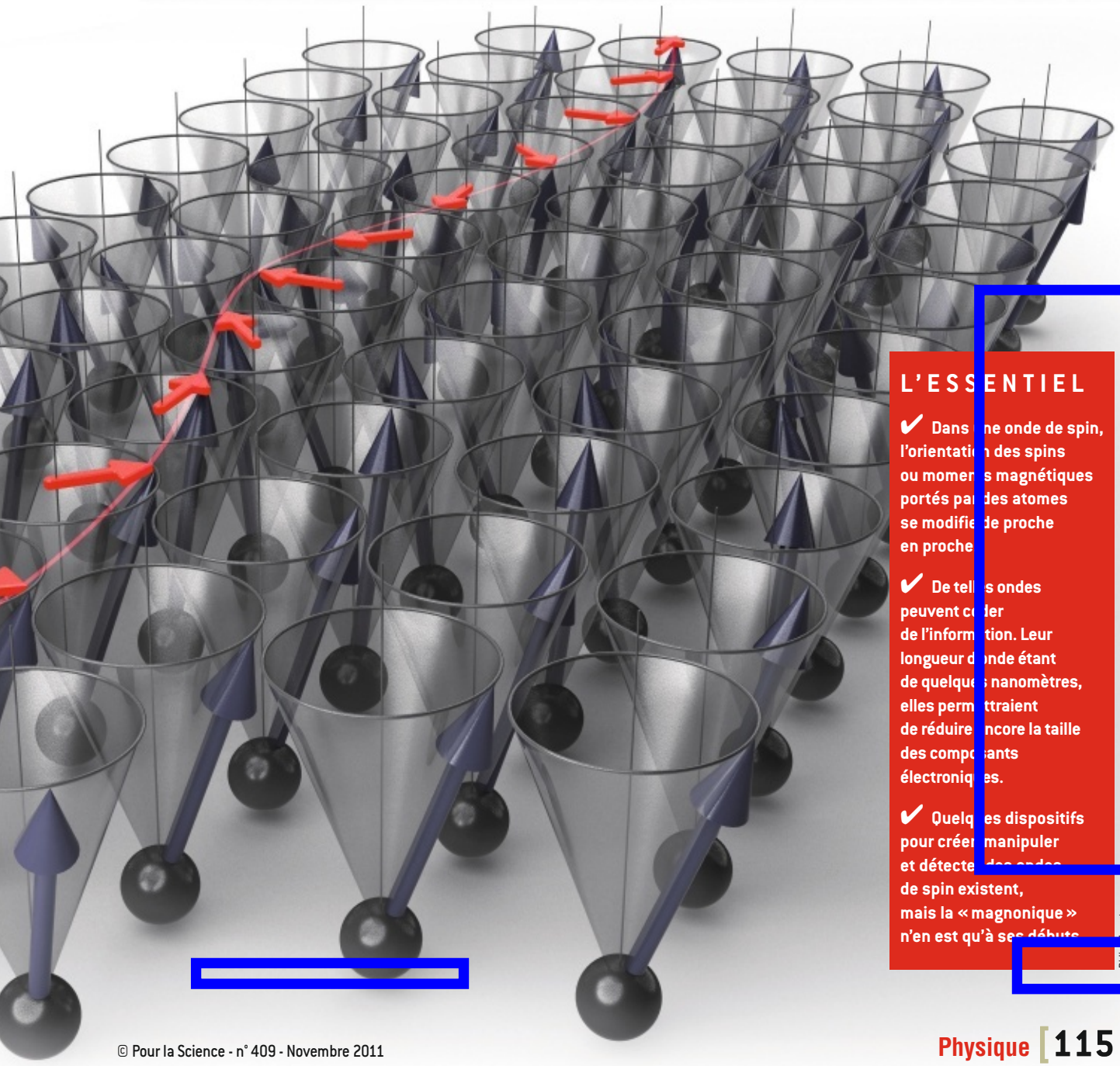
un axe de mesure, quel qu'il soit, le spin d'un électron ne peut valoir que 1/2 (spin vers le « haut » si l'axe choisi est vertical) ou –1/2 (spin vers le « bas ») dans les unités atomiques.

Quand on lui applique un champ magnétique approprié, le spin de l'électron bascule d'une orientation à l'autre. L'utilisation du spin dans les dispositifs spintroniques repose sur cette propriété, qui permet de stocker de l'information : le support matériel est divisé en minuscules zones correspondant à autant de bits d'information, et un champ magnétique est appliqué bit par bit pour orienter les spins des électrons des atomes présents. Chaque zone correspondra alors à un bit de valeur 0 ou 1 selon l'orientation « haut » ou « bas » des spins dans cette zone.

La spintronique, ou électronique de spin, s'est illustrée par la découverte en 1988 de l'effet de magnétorésistance géante par les équipes d'Albert Fert, à l'Université de Paris-Sud, et de Peter Grünberg, à l'Université de Cologne en Allemagne, couronnés par le prix Nobel de physique en 2007. Il s'agit d'une forte augmentation de la résistance électrique de certaines structures magnétiques multicouches lorsqu'elles sont soumises à un faible champ magnétique. Le phénomène repose sur le fait que parmi les électrons traversant un métal magnétique, ceux dont le spin est de même orientation que l'aimantation du métal passent plus facilement que les autres. L'effet de magnétorésistance géante est à la base des mémoires MRAM, les plus puissantes à l'heure actuelle sur le marché.

Malgré ces succès, le développement de l'électronique fondée sur les semi-conducteurs ou sur la spintronique se heurte à des obstacles. Maintenant que les tailles de composants semi-conducteurs atteignent environ 22 nanomètres, la course à la miniaturisation semble marquer le pas.

En effet, en deçà, il apparaît par exemple des courants de fuite, dus à des phénomènes quantiques. La miniaturisation est également enrayée dans les dispositifs spintroniques : le champ magnétique devant être assez intense pour retourner l'ensemble des



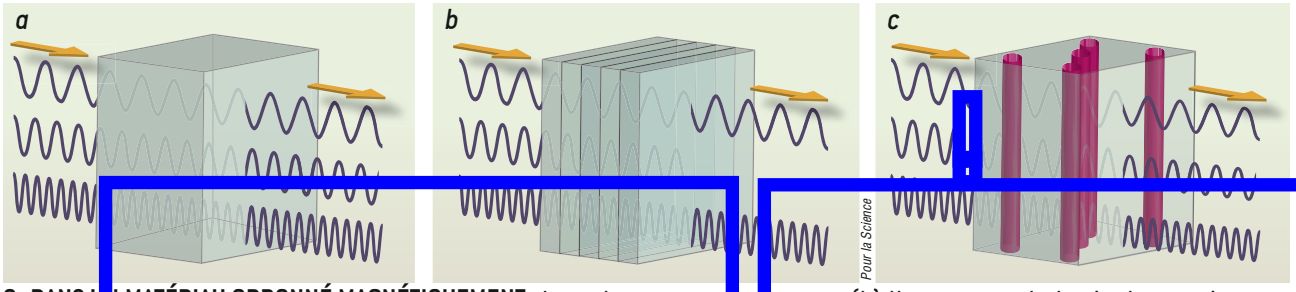
Didier Lorentz

## L'ESSENTIEL

✔ Dans une onde de spin, l'orientation des spins ou moments magnétiques portés par des atomes se modifie de proche en proche.

✔ De telles ondes peuvent coder de l'information. Leur longueur d'onde étant de quelques nanomètres, elles permettraient de réduire encore la taille des composants électroniques.

✔ Quelques dispositifs pour créer, manipuler et détecter des ondes de spin existent, mais la « magnonique » n'en est qu'à ses débuts.




**2. DANS UN MATÉRIAU ORDONNÉ MAGNÉTIQUEMENT,** des ondes de spin de différentes fréquences se propagent et ressortent à l'identique : le matériau constitue un guide d'ondes *(a)*. Un empilement de couches de différents matériaux ordonnés magnétiquement forme un « cristal magnonique » où, selon leur fréquence, certaines ondes de spin ne peuvent se propager *(b)*. Un autre exemple de cristal magnonique met en jeu des cylindres magnétiques régulièrement disposés au sein d'une matrice faite d'un matériau magnétique différent *(c)*. Les ondes de spin qui y pénètrent ressortent avec une amplitude qui dépend de la taille et de l'espacement des cylindres.

spins d'un bit, il présente une extension spatiale irréductible, ce qui empêche de diminuer la taille du bit au-dessous des quelque 200 nanomètres actuels.

Comment surmonter ces difficultés ? Une possibilité consiste à s'intéresser au comportement collectif des spins plutôt qu'à leur contrôle individuel. Il s'agit d'exploiter la notion d'ondes de spin, introduite par le physicien d'origine suisse Félix Bloch en 1930. Les ondes de spin apparaissent dans les matériaux ordonnés magnétiquement (matériaux ferromagnétiques par exemple). Ce sont des cristaux où les atomes portent un moment magnétique.

Le moment magnétique d'un atome est la résultante des spins des électrons en orbite autour de son noyau. Comme les électrons atomiques s'organisent en paires de spins opposés, un atome porte un moment magnétique quand ses électrons ne sont pas tous appariés.

Dans les matériaux ordonnés magnétiquement, les atomes ne sont pas isolés, mais ont des interactions quantiques avec leurs voisins. À basse température, les spins des atomes sont immobiles et alignés. Lorsqu'on les excite, soit avec un champ extérieur, soit en augmentant la température, les spins effectuent un mouvement de précession, c'est-à-dire qu'ils décrivent un cône autour de la direction de l'aimantation macroscopique du milieu (à l'instar de l'axe d'une toupie écartée de la verticale) *(voir la figure 1)*.

Les spins étant assimilables à de petits aimants qui interagissent, la position de l'un détermine celle de ses voisins immédiats, qui fixe à son tour celle de ses voisins, etc. De proche en proche, les spins s'influencent mutuellement, ce qui donne lieu à une précession cohérente. D'un point de vue classique, une perturbation de l'un des spins se répercute progressivement sur la précession des autres ; une onde de spin est ainsi engendrée. Sa longueur d'onde dépend du cristal ; elle est de quelques nanomètres, soit quelques distances interatomiques.

## Les magnons, quanta des ondes de spin

D'après les lois de la physique quantique, les ondes de spin transportent de l'énergie par petites quantités bien définies. Ces quanta d'énergie sont nommés magnons, par analogie aux photons qui sont les quanta des ondes électromagnétiques. La magnonique désigne ainsi le domaine de l'électronique qui porte sur les ondes de spin, à distinguer de la spintronique, relative à l'utilisation des spins eux-mêmes.

Comme les autres types d'ondes, les ondes de spin peuvent être créées, se propager, être réfléchies, interférer, etc. Comme les ondes radio, elles peuvent coder de l'information si on module leur phase, leur amplitude ou leur fréquence.

La magnonique pourrait ouvrir une ère nouvelle en électronique grâce à de nombreux avantages. D'abord, les ondes de spin sont faciles à produire et à manipuler. Elles apparaissent spontanément dans des cristaux ordonnés magnétiquement lorsqu'on élève la température, mais elles ne sont pas cohérentes. Elles le deviennent quand on leur apporte de l'énergie (on dit qu'on les excite) à l'aide d'un champ électromagnétique, tout comme un verre en cristal frappé d'un léger coup de cuillère émet un son qui révèle la fréquence propre de vibration du cristal.

Ensuite, à l'instar de la lumière dans les fibres optiques, les ondes de spin peuvent être transportées dans des guides magnétiques, composés par exemple de cristal YIG (

LES AUTEURS

Maximilien CAZAYOUS, Yann GALLAIS et Alain SACUTO sont enseignants-chercheurs au Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques du CNRS et de l'université Paris Diderot.

## BIBLIOGRAPHIE

Rovillain *et al.*, Electric-field control of spin waves at room temperature in multiferroic $BiFeO_3$, *Nature Material*, vol. 9, pp. 975-979, 2010.

V. Krugly[k] *et al.*, Magnonics, *Journal of Physics D*, vol. 43, article 264001, 2010.

Khitun *et al.*, Magnonic logic circuits, *Journal of Physics D*, vol. 43, article 264005, 2010.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

grenat yttrium-fer, des composés synthétiques tels que $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$, de permalloy (alliage fer-nickel), etc., sans atténuation ni dégradation du signal. On peut aussi facilement les convertir en une tension électrique : une onde de spin peut engendrer un champ magnétique, qui par induction peut créer une tension.

Enfin, et c'est leur atout majeur, les ondes de spin peuvent avoir une longueur d'onde très courte et ont une « longueur de cohérence » élevée (une centaine de micromètres), ce qui signifie que les propriétés de l'onde sont conservées sur des distances largement supérieures à la taille des dispositifs nanométriques.

Ces caractéristiques permettent d'envisager des dispositifs fonctionnant dans un domaine de fréquences qui va du gigahertz au térahertz (1 000 gigahertz), c'est-à-dire des dispositifs bien plus performants que ceux d'aujourd'hui (les microprocesseurs sont d'autant plus rapides qu'ils fonctionnent à fréquence élevée).

Le seul point faible des ondes de spin serait leur faible vitesse de propagation, inférieure de deux ordres de grandeur à celle de la lumière. Toutefois, cela ne présente pas d'inconvénient pour des circuits électroniques de quelques nanomètres carrés, la faible taille compensant la vitesse de propagation réduite. Ainsi, un composant mesurant un centimètre carré et formé de circuits magnoniques d'une taille similaire à celle d'un transistor semi-conducteur (une vingtaine de nanomètres) pourrait traiter 1 000 milliards d'opérations en une nanoseconde, contre 500 millions pour un composant à transistors actuels.

Un dispositif magnonique comporte trois éléments faisant chacun l'objet de recherches actives : une source d'ondes de spin, un matériau où les ondes sont manipulées pour coder de l'information et un détecteur. La production d'ondes de spin est un premier défi. Dans un cristal adéquat, afin de mettre les spins en mouvement, il suffit de les soumettre à un champ magnétique dont la fréquence correspond à celle des modes propres (les fréquences de précession spontanées) du matériau. On utilise pour cela un champ magnétique de radiofréquence pulsé ou des impulsions optiques très brèves (la lumière étant une onde électromagnétique, les spins sont sensibles à sa composante magnétique). L'utilisation d'impulsions est plus économe en énergie et offre une plus grande gamme de fréquences dans le signal excitateur. Elle est donc susceptible d'exciter simultanément davantage de modes.

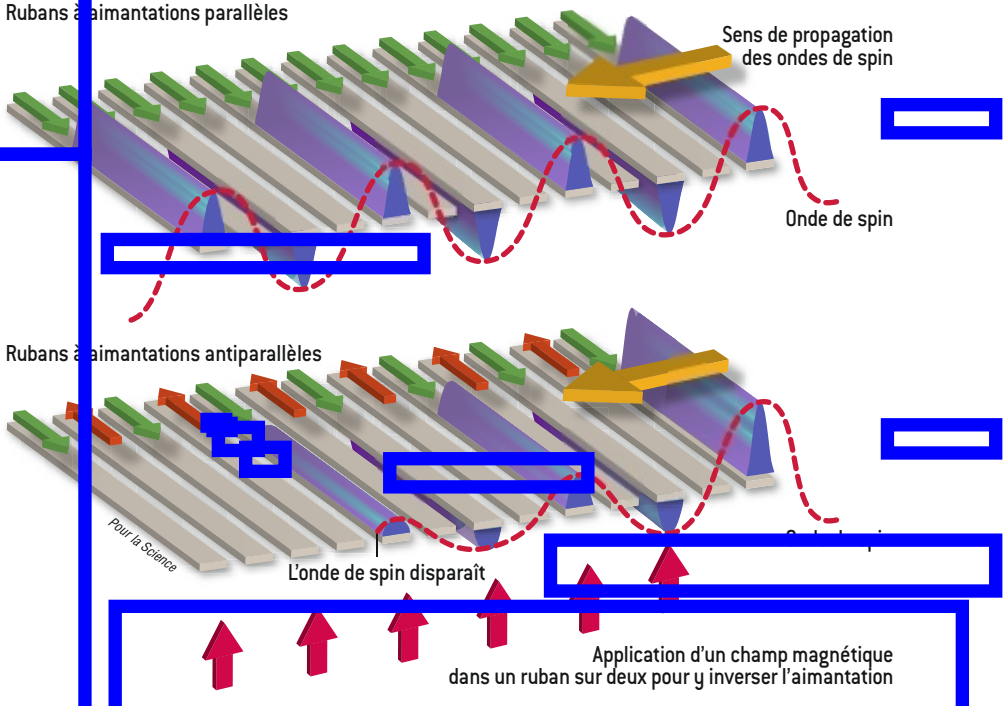
Pour ce qui est du cœur du dispositif magnonique, un matériau où l'onde de spin est manipulée, les recherches s'orientent soit vers des structures périodiques de matériaux magnétiques nommées cristaux magnoniques, soit vers de nouveaux matériaux.

## Des matériaux filtreurs d'ondes

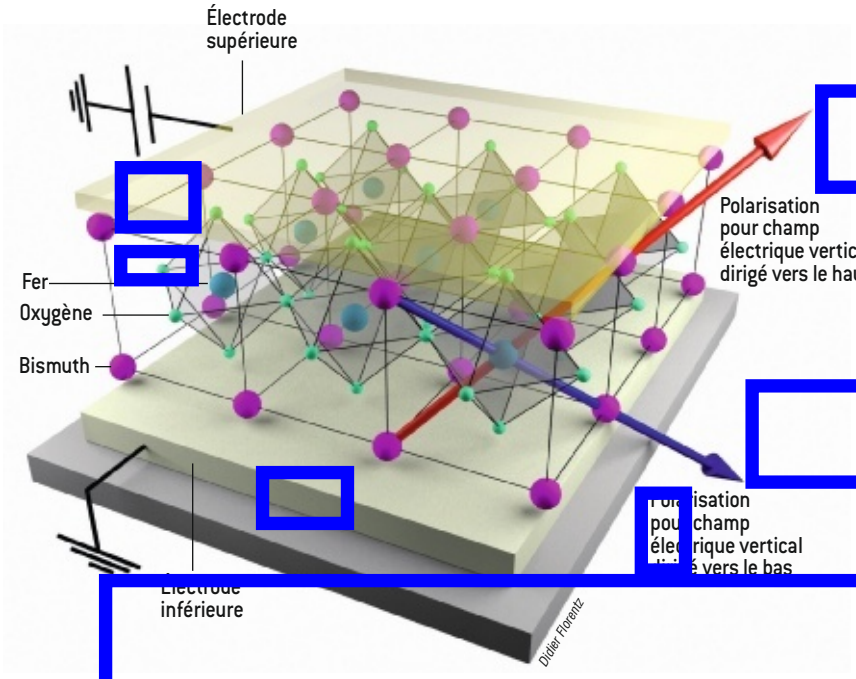
Les cristaux magnoniques consistent en des empilements périodiques de couches magnétiques (*voir la figure 2*). Dans de telles structures, certaines fréquences d'ondes de spin ne peuvent se propager. Cette propriété est analogue à celle d'un cristal périodique où les électrons ont des bandes d'énergies permises, séparées par des bandes d'énergies interdites (les caractéristiques de ces bandes expliquent pourquoi le solide est isolant, semi-conducteur ou conducteur). Ainsi, une onde de spin qui arrive sur un cristal magnonique avec un spectre composé d'une vaste gamme de fréquences en ressort avec un spectre modifié. Les fréquences transmises forment la bande passante du cristal.

Un autre exemple de cristal magnonique à deux dimensions met en œuvre des cylindres ferromagnétiques espacés d'une dizaine de nanomètres dans une matrice constituée d'un autre matériau ferromagnétique. La période et la taille des cylindres (entre 5 et 30 nanomètres) créent des bandes de fréquences interdites, mais permettent aussi de moduler avec précision l'amplitude de l'onde. Quand une onde de spin est envoyée dans la structure, elle rencontre des cylindres magnétiques ayant des propriétés magnétiques différentes de la matrice. L'onde traverse des milieux dotés d'« indices magnétiques » différents, comme une onde sismique se propageant dans la Terre rencontre des types de roches différents). À sa sortie, l'amplitude de l'onde sera ainsi modifiée.

Certains cristaux magnoniques sont reprogrammables, c'est-à-dire qu'on peut contrôler leur réponse. Considérons un cristal constitué de rubans ferromagnétiques parallèles (*voir la figure 3*). Quand l'aimantation de tous les rubans pointe dans le même sens, le cristal magnonique se comporte comme un matériau ferromagnétique quelconque et l'onde de spin s'y propage de façon ordinaire. En




**3. UN DISPOSITIF CONSTITUÉ DE RUBANS** ferromagnétiques peut constituer un interrupteur pour les ondes de spin. Si les aimantations de tous les rubans sont orientées dans le même sens *(a)*, une onde de spin s'y propage normalement. Son amplitude *(en violet)* n'est pas affectée, ni sa longueur d'onde (égale ici arbitrairement à la largeur de quatre rubans). Mais si les aimantations des rubans sont antiparallèles (suite à l'application d'un champ magnétique dans un ruban sur deux), l'onde de spin s'atténue jusqu'à disparaître.




**4. UN CHAMP ÉLECTRIQUE APPLIQUÉ** au composé multiferroïque $BiFeO_3$ modifie la position des ions bismuth ($Bi^{3+}$) et oxygène ($O^{2-}$). Il s'ensuit une modification de la polarisation électrique du cristal. Ces déplacements entraînent aussi un déplacement des ions ferriques ($Fe^{3+}$), qui portent un spin. Les changements des positions relatives des spins modifient leurs interactions et, par conséquent, la fréquence des ondes de spin se propageant dans le cristal. Les auteurs et leurs collègues ont montré que l'application d'un champ électrique peut ainsi modifier de 30 pour cent cette fréquence.

revanche, quand on fait alterner l'orientation magnétique des rubans, les mouvements de précession des spins sont perturbés. L'onde de spin incidente perd sa cohérence, s'atténue et finit par s'éteindre : elle est bloquée. Ainsi, le dispositif laisse ou non passer l'onde, à volonté.

La recherche de nouveaux matériaux s'oriente vers les matériaux multiferroïques. Ce sont des matériaux redécouverts il y a moins de dix ans qui présentent au moins deux propriétés dites ferroïques, parmi le ferromagnétisme (existence d'une aimantation spontanée), la ferroélectricité (polarisation électrique spontanée) et la ferroélasticité (déformation spontanée). Ils ont été découverts et étudiés dans les années 1950 en Union soviétique, avant d'être qualifiés en 1994 de multiferroïques par Hans Schmid, de l'Université de Genève. Puis, grâce aux progrès des techniques de synthèse, des matériaux ont été obtenus avec une grande pureté, ce qui a renforcé leurs propriétés et suscité un regain d'intérêt des chercheurs.

Dans les matériaux multiferroïques qui nous intéressent, il y a couplage entre ferromagnétisme et ferroélectricité. En clair, les ondes de spin interagissent avec la polarisation électrique du matériau (due à un décalage des ions par rapport à leurs positions initiales dans le réseau cristallin). On parle de couplage magnéto-électrique, qui ouvre une nouvelle voie pour contrôler les ondes de spin, non plus seulement à l'aide d'un champ magnétique, mais à l'aide d'un champ électrique. En effet, l'application d'un champ électrique modifie la polarisation, ce qui influe sur les ondes de spin.

L'utilisation d'un champ électrique a deux avantages. D'une part, le coût énergétique est faible. D'autre part, l'extension spatiale de ce champ est inférieure à celle d'un champ magnétique, ce qui est un atout pour la miniaturisation.

## Un interrupteur magnonique

En 2011, nous avons montré qu'un champ électrique appliqué à un matériau multiferroïque module la fréquence des ondes de spin de plus de 30 pour cent à température ambiante *(voir la figure 4)*.

Un empilement composé de tels multiferroïques peut faire office d'interrupteur magnonique. Comment ? L'empilement, nous l'avons vu, crée une bande de fréquences interdites. Une onde de fréquence permise peut se propager dans la structure. Mais en appliquant un champ électrique, on augmente la fréquence de l'onde de 30 pour cent. Si elle a été bien choisie, elle entre alors dans la gamme des fréquences interdites et l'onde est bloquée. Lorsque le champ électrique disparaît, l'onde peut à nouveau traverser le dispositif, qui fait donc office d'interrupteur.

Les physiciens ont aussi conçu des portes logiques, briques fondamentales du traitement de l'information. Un premier dispositif de base d'ondes de spin a été élaboré en 2005. L'équipe de Mikhail Kostylev, de l'Université d'Australie occidentale, a mis au point un dispositif pour faire interférer les ondes de spin et ainsi moduler le signal de sortie. Une structure semblable a permis en 2008 de mettre au point des portes logiques de type ET, OU et NON. Ces différentes réalisations ont prouvé que la magnonique dispose des outils essentiels pour forger l'électronique de demain.

Dans la détection des ondes de spin, la principale difficulté est de faire correspondre la fréquence des ondes utilisées en guise de sonde à celle des ondes de spin. Les premières mesures ont été réalisées par absorption de micro-ondes. Des micro-ondes sont envoyées sur le matériau, où elles sont en partie absorbées, puis ressortent et sont enregistrées. Les fréquences du spectre d'absorption obtenu correspondent aux fréquences propres des ondes de spin.

Les ondes de spin présentes dans les dispositifs magnoniques nanométriques sont de courte longueur d'onde, donc de fréquence élevée (de l'ordre du térahertz). Or les micro-ondes ont, en comparaison, une longueur d'onde trop grande pour être utiles dans cette situation.

Il existe par ailleurs des techniques optiques pour détecter des ondes de spin, mais elles sont également limitées à des fréquences très inférieures au térahertz. Le principe de ces sondes optiques est le suivant. De la lumière de fréquence connue est envoyée sur le matériau, où les photons interagissent avec les magnons et quittent le matériau avec une fréquence inférieure. On en déduit la fréquence des ondes de spin. Mais à ce jour, la résolution spatiale d'une sonde optique est de quelques centaines de nanomètres, ce qui est trop grand pour des dispositifs nanométriques. En outre, au-delà de 100 gigahertz, le couplage entre l'onde lumineuse et les magnons est insuffisant. La détection de magnons dans le domaine du térahertz devra donc faire appel à d'autres techniques.


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

Il reste que, pour des dispositifs pas trop petits, on peut exciter ou détecter des magnons à l'aide de micro-ondes ou d'ondes lumineuses du domaine visible. C'est pourquoi des dispositifs magnoniques peuvent s'intégrer aisément à l'électronique photonique, par exemple dans les disques magnéto-optiques.

Les défis de la magnonique ne manquent pas. Le principal réside dans le passage de la technologie développée à l'échelle micrométrique, opérationnelle aujourd'hui, vers une technologie fonctionnant à l'échelle nanométrique. Cette miniaturisation se heurte aux limites des outils actuels de nanolithographie. Il existe toutefois d'autres techniques prometteuses, par exemple la cristallisation de colloïdes, qu'il faudra combiner avec les techniques classiques d'élaboration des dispositifs magnétiques, telles la lithographie électronique (gravure avec un faisceau d'électrons) ou l'épitaxie par jets moléculaires (dépôt de couches sous vide à l'aide de faisceaux de molécules).

Un autre défi majeur concerne la compréhension des phénomènes en jeu. La propagation des ondes de spin est complexe, en particulier quand des irrégularités sont présentes ou quand ces ondes interagissent avec d'autres types d'excitations présentes dans le matériau (phonons, plasmons, électrons, etc.).

## Des électromagnons plus dociles

Ces recherches fondamentales réservent peut-être encore des surprises, à la hauteur de celle causée par la découverte d'une nouvelle excitation hybride dans les multiferroïques en 2006. Nommée électromagnon, elle prédite dès les années 1970 par les Ukrainiens Viktor Bar'yakhtar et Irina Chupis, il aura fallu attendre plus de 20 ans pour qu'Andrei Pimenov et ses collègues de l'Université d'Augsburg, en Allemagne, la détectent dans deux matériaux multiferroïques ($TbMnO_3$ et $GdMnO_3$). En 2008, notre équipe a également découvert des électromagnons dans le multiferroïque $BiFeO_3$.

L'électromagnon est une excitation hybride, mi-onde de spin, mi-vibration polaire : c'est un magnon doté d'un dipôle électrique. Il provient d'un couplage intense entre le magnétisme et la ferroélectricité, mais le mécanisme microscopique qui en est à l'origine demeure mal connu. Il reste par exemple à déterminer pourquoi certains multiferroïques donnent naissance à des électromagnons, et pas d'autres.

Quoi qu'il en soit, les électromagnons offrent la possibilité de contrôler plus efficacement les ondes de spin *via* un champ électrique. Dans les multiferroïques « classiques », l'application d'un champ électrique modifie la position des ions, qui influe à son tour sur les ondes de spin, tandis que dans les matériaux multiferroïques où sont présents des électromagnons, le champ électrique agit directement... sur les électromagnons.

La magnonique en est à ses balbutiements. Les défis théoriques et techniques sont nombreux et, comme le montre le cas des électromagnons, fortement intriqués. Ils ouvrent en tout cas la perspective d'une électronique nanométrique performante. ■

# Des ondes dans le cerveau

Stéphane Charpier

**Les neurones sont le siège de mouvements de particules chargées, qui créent des microcourants responsables des ondes électriques enregistrées à la surface du crâne. La fréquence de ces ondes reflète l'état de vigilance et de conscience.**

Si l'on pose une électrode métallique à la surface du crâne d'un sujet, et qu'on la connecte à un amplificateur couplé à un oscilloscope, on observe des fluctuations spontanées du potentiel électrique dont l'amplitude peut varier de quelques microvolts à plusieurs millivolts. On enregistre ainsi des variations de potentiel dans les diverses aires du cerveau : ce sont les ondes cérébrales. Ce phénomène bioélectrique intrigant résulte de mécanismes neuronaux complexes, partiellement élucidés (nous y reviendrons), et constitue la seule information issue du cerveau pendant que l'on peut analyser en temps réel, avec une précision de l'ordre de la milliseconde.

Les ondes électriques cérébrales sont présentes dans l'ensemble du règne animal. Elles peuvent être enregistrées chez toutes les espèces, des centres nerveux des mollusques constitués de quelques neurones globulaires compactés, jusqu'au cerveau humain contenant environ $10^{12}$ neurones. La gamme des fréquences utilisées dans le règne animal – du dixième à plusieurs centaines de hertz – a été conservée au cours de l'évolution, malgré le développement des structures cérébrales et l'émergence de nouvelles aptitudes comportementales, et l'émergence de nouveaux processus mentaux. Quelques différences ont été néanmoins identifiées, mais on en ignore l'origine et la signification. Il semblerait que les ondes cérébrales des poissons et des reptiles, entre autres, aient une amplitude inférieure à celle des mammifères.

## Des ondes cérébrales omniprésentes

Par ailleurs, le cerveau des invertébrés, notamment celui des insectes, crustacés, gastéropodes, vers de terre et autres annélides, produirait plus d'ondes électriques de fréquences supérieures à 100 hertz que celui des vertébrés. Enfin, notons que la pieuvre *Octopus vulgaris*, dont l'activité électrique cérébrale est similaire à celle des vertébrés, est le seul animal chez qui les ondes cérébrales présentent des interruptions transitoires inexplicables : pendant plusieurs minutes, l'activité cérébrale cesse... mais on ignore pourquoi.

La plupart des manuels de neurologie indiquent que les ondes électriques cérébrales ont été décrites chez l'homme dans les années 1920 par le psychiatre allemand Hans Berger (1873-1941), lequel publia ses découvertes en 1929 et inventera le terme électroencéphalogramme, ou EEG, encore utilisé aujourd'hui pour qualifier les décharges électriques enregistrées à la surface et dans la profondeur du cerveau. Toutefois, l'existence d'une activité électrique cérébrale spontanée avait été découverte un demi-siècle plus tôt par un jeune enseignant de l'École de médecine de Liverpool, Richard Caton (1842-1926). Le 4 août 1875, il publiait dans les comptes rendus de l'Association médicale britannique ses observations préliminaires, obtenues chez le lapin et le singe, indiquant que de faibles courants spontanés peuvent être systématiquement enregistrés entre deux électrodes placées à la surface du cortex cérébral et que ces ondes électriques semblent être en relation avec la fonction de la région corticale concernée.

Dès la fin du XIX$^{e}$ siècle, il fit avec d'autres neurophysiologistes de nombreuses découvertes, qui ont toutes été confirmées ultérieurement, sur les propriétés des potentiels électriques cérébraux. Il montra que ces potentiels sont souvent de nature oscillatoire, qu'ils sont modulés par des stimulations sensorielles



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

© Shutterstock/Andrea Danti

les et qu'il apparaissent quand les régions corticales où on les enregistre sont activées. Mais il fallut encore une cinquantaine d'années pour comprendre les mécanismes de leur formation.

Le premier à avoir proposé un modèle neuronal pour expliquer l'origine des ondes cérébrales fut l'Anglais Edgar Douglas Adrian (1889-1977). Il reçut le prix Nobel de médecine et de physiologie en 1932 pour avoir découvert que l'information sensorielle, par exemple la tension musculaire, est directement liée à l'activité électrique des fibres nerveuses qui connectent les muscles. Après avoir étudié l'activité des fibres nerveuses, il explora les propriétés des rythmes électroencéphalographiques dans le cortex de l'homme, mais les mécanismes qu'il proposa pour les expliquer étaient faux.

Après avoir examiné le modèle permettant d'expliquer la présence d'un courant électrique, de différences de potentiel et d'ondes dans le cerveau, nous verrons quelles informations on peut extraire d'un EEG, et comment ces enregistrements sont une façon d'aborder l'étude de la conscience. Commençons par la première question : comment les neurobiologistes expliquent-ils aujourd'hui la présence de courants électriques dans le cerveau ? Ils assimilent les neurones pyramidaux, qui représentent l'essentiel (80 pour cent environ) des neurones du cortex, à des dipôles électriques produisant des courants extracellulaires à l'origine des ondes cérébrales.

## L'hypothèse du dipôle

Les corps cellulaires des neurones pyramidaux, qui ont une forme triangulaire, sont répartis dans diverses couches du cortex (on en distingue six). Les neurones pyramidaux ont la particularité de présenter une grande dendrite dite apicale d'où partent de nombreux prolongements. Les dendrites apicales parcourent de longues distances et se projettent jusqu'à la surface du cortex. Elles sont connectées aux axones issus d'autres neurones par des synapses ; les axones assurent une transmission rapide des signaux nerveux.

Comment applique-t-on le modèle du dipôle aux neurones pyramidaux ? Un dipôle électrique « idéal » est un élément conducteur portant sur des sites adjacents des charges électriques, égales en

### L'ESSENTIEL

- Les courants électriques dus à des déplacements d'ions à travers la membrane des neurones donnent naissance à des différences de potentiel électrique, signal détecté dans les électroencéphalogrammes.
- Le traitement par transformation de Fourier permet de faire apparaître dans un EEG toutes les fréquences qui le composent.
- L'enregistrement, lors d'une crise d'épilepsie de type absence, d'un EEG, reflète l'activité cérébrale globale et de l'activité de neurones isolés, permet de préciser les mécanismes du passage de la conscience à l'état inconscient.

L'AUTEUR

Stéphane CHARPIER, professeur de neurosciences à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) est directeur de recherche à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, ICM, à Paris.

## ✔ À ÉCOUTER

Jeudi 10 novembre 2011, Stéphane Charpier évoquera les recherches menées sur les ondes cérébrales dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h.

www.franceculture.fr

nombre et de signes opposés. Ainsi, les neurones pyramidaux du cortex cérébral peuvent être considérés comme des dipôles électriques canalisant les microcourants électriques induits par l'activation des synapses. Voyons comment naissent ces courants élémentaires.

Les neurones pyramidaux établissent des connexions – des synapses – entre eux et avec des neurones des structures sous-corticales, notamment du thalamus qui traite les informations sensorielles et leur sert de relais ; le thalamus participe à la régulation de la veille, du sommeil et de la conscience. Les neurones du thalamus établissent des contacts synaptiques avec les neurones pyramidaux et libèrent du glutamate, le principal neurotransmetteur excitateur, dans les synapses, ce qui stimule le neurone pyramidal postsynaptique *(voir l'encadré page ci-contre)*.

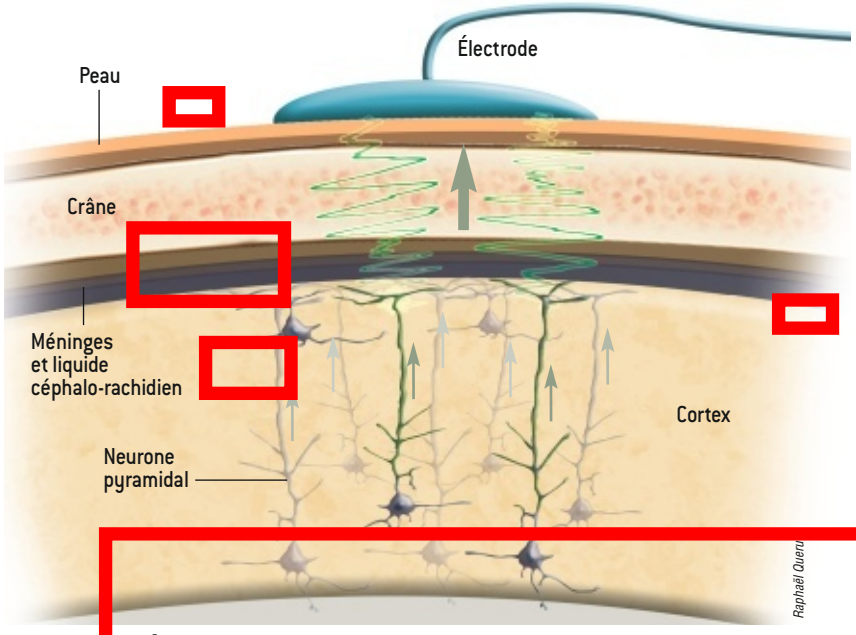
La fixation du glutamate sur ses récepteurs synaptiques déclenche l'ouverture de canaux situés dans la membrane des neurones pyramidaux permettant à un flux d'ions positifs de pénétrer dans la dendrite. Ce flux de charges positives entrant dans la dendrite entraîne une redistribution des charges positives selon l'axe de la dendrite, laquelle canalise le courant vers des régions intracellulaires moins « positives ». La ligne de courant traverse les canaux membranaires où diffusent les ions, se propage dans le milieu extracellulaire et revient à l'endroit de la synapse qui a perçu des charges positives.

Nous avons évoqué ici le cas des synapses excitatrices. Le même raisonnement peut être appliqué aux synapses inhibitrices, où le neurotransmetteur n'est plus le glutamate, mais l'acide gamma-aminobutyrique (GABA), le principal neurotransmetteur inhibiteur. Ces synapses inhibitrices, situées sur les neurones pyramidaux, sont issues d'un autre type de neurones, les interneurones (ou neurones intermédiaires). Ces derniers peuvent être activés par les neurones thalamiques et les neurones pyramidaux eux-mêmes. Les interneurones provoquent dans le neurone pyramidal un courant local sortant par entrée d'anions (ions chlore) ou sortie de cations (ions potassium). Si l'on considère les lignes de courant entre l'intérieur et l'extérieur du neurone, une ligne de courant due à une synapse inhibitrice est l'inverse de celle correspondant à une synapse excitatrice.

## Une somme de courants élémentaires

Par conséquent, le neurone se comporte comme un dipôle présentant des « sources » et des « puits » de courants synaptiques : les fuites de charges électriques de l'intérieur vers l'extérieur du neurone constituent les sources, tandis que les régions synaptiques d'origine, appauvries en charges électriques, se comportent comme des puits vers lesquels convergent les lignes de courant. Le modèle du dipôle est très efficace, mais se heurte à deux difficultés : d'une part, l'amplitude des ondes cérébrales enregistrées à la surface du crâne ou du cerveau dépend, selon la loi d'Ohm, du produit de l'intensité des courants synaptiques et de la résistance électrique du tissu cérébral, deux paramètres de faible valeur rendant les potentiels électriques cérébraux « unitaires » (issus de chaque synapse) extrêmement faibles. D'autre part, le potentiel électrique décroît en fonction du carré de la distance à sa source.

Dans ces conditions, comment peut-on enregistrer aussi aisément des ondes électriques sur le cerveau ? C'est rendu




**1. LES ONDES ÉLECTRIQUES DE SURFACE,** qui sont détectées par les électrodes placées à la surface du crâne, représentent la somme des courants synaptiques extracellulaires engendrés par les neurones pyramidaux. Ces derniers se comportent comme des dipôles électriques et leurs dendrites apicales quasi parallèles favorisent cette somme des courants individuels. Le courant global résultant est assez intense pour être détecté, malgré les différentes structures qui recouvrent le cortex.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

possible par l'arrangement géométrique des dendrites apicales, parallèles entre elles et perpendiculaires à la surface incurvée du cerveau *(voir la figure 1)*. Un tel arrangement permet aux courants synaptiques de chaque neurone naissant dans le tissu cérébral de s'additionner dans l'espace et dans le temps. Ainsi, la sommation spatiotemporelle de chaque courant élémentaire produit un courant macroscopique détectable par des électrodes placées sur le crâne.

Parce que des courants parallèles s'ajoutent, la survenue synchrone de courants synaptiques dans un grand nombre de neurones se traduit par des ondes électroencéphalographiques dont l'amplitude est d'autant plus grande que le nombre de synapses impliquées est grand ; sa polarité (négative et positive) dépend du sens des courants synaptiques (excitateurs ou inhibiteurs). On sait par ailleurs que la durée des ondes cérébrales dites très corrélées est d'autant plus brève et leur amplitude d'autant plus grande que le nombre de synapses impliquées est important et que ces synapses sont activées quasi simultanément. Au contraire, de multiples activités synaptiques dites faiblement corrélées dans le temps sont reflétées sur un EEG de surface par des ondes rapides et de faible amplitude.

Ainsi, on comprend l'origine des courants électriques détectés sur le scalp. Encore faut-il pouvoir enregistrer ces courants, et savoir interpréter les tracés obtenus. Jusqu'au début du XX$^{e}$ siècle, les méthodes utilisées pour décrire les ondes électriques cérébrales ne permettaient pas de détecter les fluctuations les plus rapides, ce qui rendait impossibles des mesures précises de la fréquence des ondes. Le physiologiste polonais Napoléon Nicodemus Cybulski (1854-1919) fut le premier à comprendre l'importance d'une représentation graphique des ondes électriques cérébrales, et réalisa en 1914 les premiers clichés photographiques des potentiels électroencéphalographiques du chien et du singe. Il découvrit ainsi des ondes rapides (de l'ordre de 25 hertz) sur le cortex, connues aujourd'hui pour être associées à l'état cérébral conscient.

Durant la seconde moitié du XX$^{e}$ siècle, de nouvelles méthodes d'enregistrement électroencéphalographique et la numérisation des signaux obtenus marquèrent le début du traitement informatique des ondes électriques cérébrales. On a ainsi pu préciser la structure temporelle et

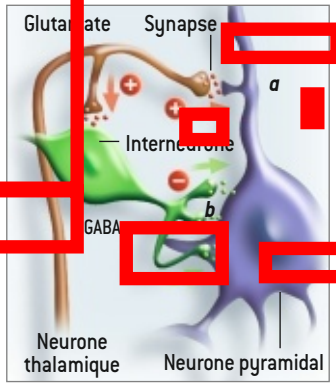
## L'ORIGINE DU COURANT ÉLECTRIQUE CÉRÉBRAL

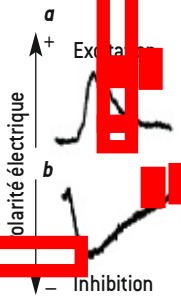
Dans le cortex, les neurones sont essentiellement des neurones pyramidaux. Les corps cellulaires de ces neurones en forme de pyramide, sont localisés dans les couches corticales II, III, V et VI. Ces neurones utilisent comme médiateur tamate, le principal neurotransmetteur excitateur *(en orange)*.

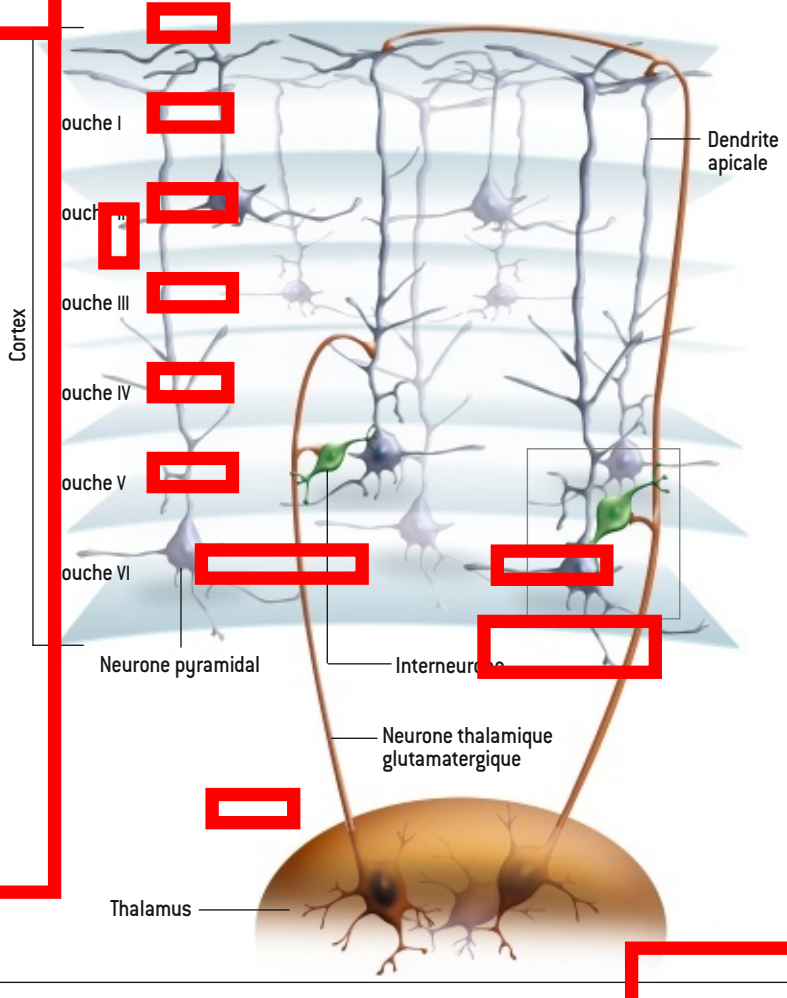
Les neurones des couches superficielles (II et III) se projettent vers les neurones corticaux du même hémisphère ou de l'hémisphère opposé. Au contraire, les neurones des couches profondes (V et VI) sont plutôt connectés avec des structures sous-corticales, notamment le thalamus.

Les neurones thalamiques se projettent en retour dans les couches I et IV du cortex où ils établissent des contacts synaptiques avec les neurones pyramidaux et avec les interneurones. Ces interneurones sont connectés aux neurones thalamiques par des synapses glutamatergiques excitatrices, aux neurones pyramidaux par des synapses GABAergiques inhibitrices. Le GABA *(en vert)* est le principal neurotransmetteur inhibiteur.

Ainsi une microélectrode peut enregistrer dans le neurone pyramidal un signal excitateur *(a)*, ou un signal inhibiteur, de polarités électriques *(b)*. Ces potentiels synaptiques, excitateurs ou inhibiteurs, sont à l'origine des ondes électriques cérébrales.




Rapsaï Queruel

spatiale de ces ondes en relation avec les états de vigilance et les tâches cognitives. La méthode la plus fréquemment utilisée pour ce type d'analyse est la transformation de Fourier. On y décompose un signal fluctuant en une somme de fonctions sinusoïdales de différentes fréquences, ce qui permet de déterminer, sur un enregistrement de l'activité électrique cérébrale, l'énergie relative des différentes fréquences des ondes qui le composent. Cette méthode permet d'extraire l'ensemble des fréquences des ondes cérébrales et de les associer à différents états de l'activité du cerveau. C'est ainsi que furent établies les bases d'une classification des fréquences des rythmes corticaux en relation avec les états de vigilance.

Un état éveillé, au repos, est généralement lié à des oscillations correspondant à dix hertz environ (c'est le rythme alpha) prédominant dans les régions occipitales. Ce sont des ondes de relativement faible amplitude et reflétant des activités synaptiques synchrones. Durant la transition vers le sommeil lent (sans rêve), de nouvelles oscillations cérébrales, plus lentes et amples, apparaissent. Dans les phases précoces du sommeil, durant lesquelles se réalise la déconnexion fonctionnelle entre le cerveau et le monde extérieur, des fuseaux d'ondes à 7-15 hertz surviennent sur le cortex. La plongée vers un sommeil plus profond peut être identifiée par la prédominance d'ondes à fréquences plus basses, les ondes delta (de 1 à 4 hertz) et les ondes dites lentes (de 0,5 à 1 hertz). L'utilisation de filtrages spécifiques du signal EEG permet d'éliminer sélectivement différentes gammes de fréquences afin de mieux révéler les autres.

L'éveil comme le sommeil avec rêve, se traduit par des modifications drastiques de la forme et de l'amplitude des ondes EEG. Deux grands types d'oscillations de faible amplitude peuvent être alors distingués sur la base de leurs fréquences. Les ondes bêta (de 15 à 30 hertz) prédominent dans les régions motrices du cortex et correspondent à la préparation de comportements moteurs. Les ondes gamma, les plus rapides (de 30 à 200 hertz), sont considérées comme le rythme de l'hypervigilance. Elles permettent peut-être à un stimulus sensoriel d'accéder à la conscience en coordonnant les réponses neuronales réparties dans tout le cortex. Toutefois, cette fonction causale du rythme gamma dans l'expérience mentale subjective, globale et cohérente, reste débattue.

Les transformées de Fourier représentent un outil utile pour le décodage des fréquences des ondes cérébrales. Elles fournissent une information globale sur l'ensemble de la durée de l'enregistrement, mais n'en donnent aucune sur le moment exact de survenue des différentes fréquences composant le signal EEG. Cela pose une difficulté, car le simple examen visuel d'un tracé électrique cérébral révèle que les oscillations sont dynamiques : leur composition en fréquences évolue au cours du temps, même lorsque l'état de vigilance ne change pas.

## La dynamique des ondes cérébrales

Peut-on résoudre cette difficulté et obtenir une analyse dynamique des ondes du cerveau ? Oui, grâce à l'analyse temps-fréquence. Il s'agit de transformer le signal enregistré en une représentation associant à chaque instant le poids relatif des différentes fréquences qui y sont présentes, mais noyées dans un signal global. De telles cartes reliant les fréquences au temps

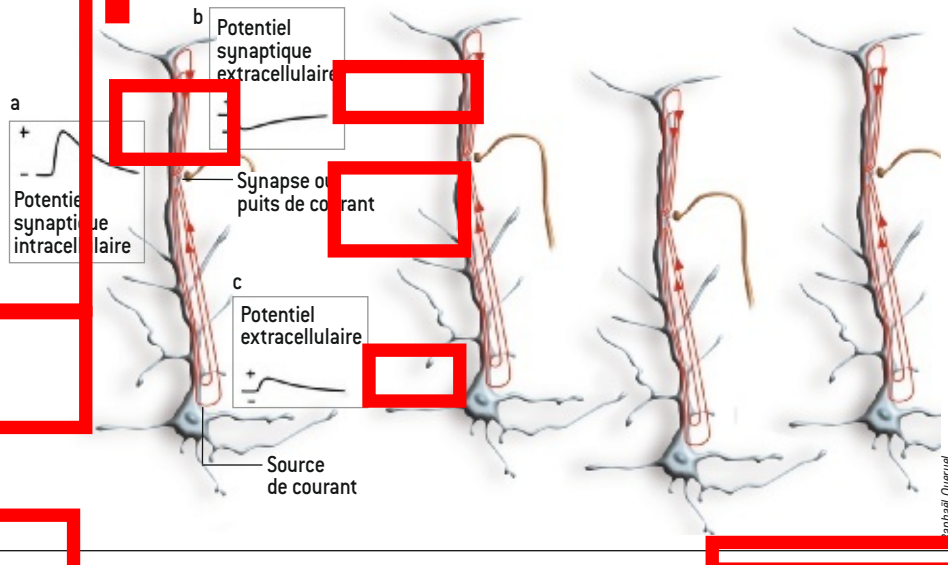
### LE MODÈLE DU DIPÔLE

Une synapse excitatrice, qui fonctionne avec le neurotransmetteur glutamate, entraîne une fuite d'ions et peut être considérée comme un puits de courant. Au contraire, à l'intérieur du neurone (cumulent, de sorte que les membranes cellulaires se comportent comme des sources de courant.

Au niveau du puits *(a)*, l'enregistrement du potentiel intracellulaire révèle une déflexion positive du potentiel (ou dépolarisation) alors qu'un enregistrement extracellulaire *(b)* indique localement une déflexion négative du potentiel (due à l'entrée de charges positives dans la cellule). L'enregistrement extracellulaire distant (au niveau de la source) *(c)* montre une variation positive du potentiel (due à la sortie de charges positives).

En effet, les charges entrent dans le neurone au niveau de la synapse, puis en sortent à distance. Dès lors, [illegible] vrie en charges électriques et représente un puits, vers lequel convergent les lignes de champ issues d'une source où se concentre, au contraire, une charges. La faible résistance électrique du milieu extracellulaire par rapport à celle de la membrane cellulaire [illegible] quoi les variations de potentiel extracellulaire [illegible] celles mesurées dans la cellule.

Ainsi, chaque neurone est le siège d'un champ électrique. Les ondes électriques de surface représentent la somme de tous les courants synaptiques extracellulaires [illegible] ramidales, lesquelles se comportent toutes comme des dipôles électriques.




Raphaël Queruel


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

(on les nomme cartes temps-fréquences) sont obtenues en faisant « glisser » sur le tracé EEG des ondelettes de durée variable (et donc de différentes fréquences) : on superpose ces « fragments » d'ondes théoriques dont on connaît les paramètres (fréquence et amplitude) au signal enregistré, et on calcule en chaque point le degré de superposition. On décompose le signal enregistré en un mélange pondéré d'ondelettes bien caractérisées. Par analogie avec les ondes sonores, ces cartes temps-fréquence permettent une représentation quantitative et qualitative de la « musique cérébrale » associée aux différents états mentaux, normaux ou pathologiques.

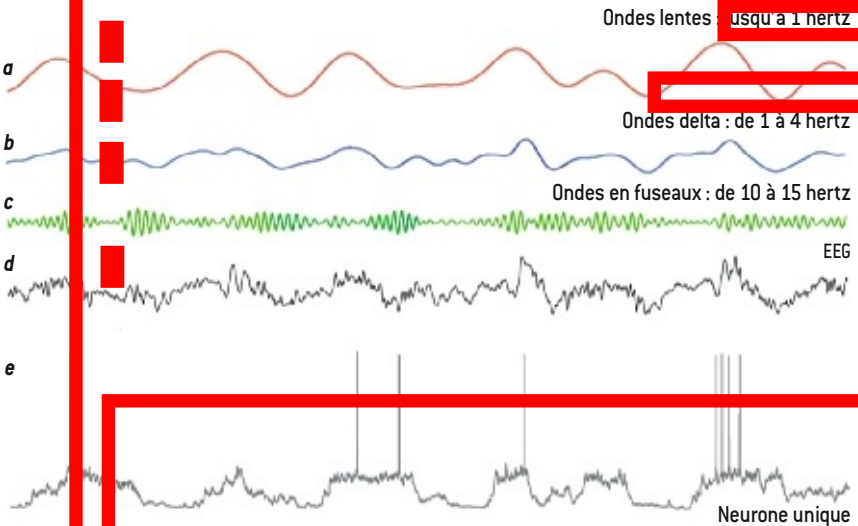
On peut déduire encore d'autres informations dynamiques d'un EEG. Ainsi, il est possible de détecter si des oscillations de même fréquence dans des régions éloignées du cerveau sont synchronisées et, si c'est le cas, quelle est la région qui a imposé sa fréquence à l'autre. On évalue ainsi la synchronisation de phase d'ondes spatialement distribuées, ce qui (et nous y reviendrons) est important dans les phénomènes liés à la conscience. De telles études des propriétés dynamiques des ondes cérébrales, réalisées en recherche fondamentale et clinique, ont permis par exemple d'élucider les dysfonctionnements survenant dans des réseaux de neurones de grande dimension au cours de l'épilepsie, la maladie de Parkinson ou la schizophrénie.

Ainsi, en utilisant les méthodes de mesure de synchronisation et de causalité, notre équipe a étudié les oscillations enregistrées lors de crises d'épilepsie de type absence, c'est-à-dire se manifestant par une perte de conscience sans contraction musculaire rythmique et durant quelques secondes. Les ondes enregistrées lors de telles crises sont apparemment synchrones dans l'ensemble du cerveau ; elles se déclenchent dans une petite région du cortex cérébral, puis se propagent dans de nombreux circuits synaptiques corticaux et sous-corticaux, responsables des symptômes cliniques observés durant la crise et qui contrôlent aussi l'arrêt de la crise. Cet exemple illustre la puissance des outils d'analyse des propriétés dynamiques des ondes cérébrales pour identifier les réseaux neuronaux responsables des syndromes neurologiques et leur impact sur le fonctionnement global du cerveau.

Comment aller plus loin dans la compréhension des mécanismes des ondes cérébrales ? Comment identifier les processus neuronaux élémentaires qui sous-tendent les phénomènes mentaux associés ? Répondre à ces questions requiert de réaliser des expériences permettant d'enregistrer simultanément, et dans un état cérébral donné, les ondes cérébrales et les variations de potentiels électriques dans les neurones individuels : il faut pouvoir relier l'activité de neurones pris isolément dans différentes aires cérébrales à l'activité électrique cérébrale globale telle que donne l'EEG. Les variations des potentiels électriques des neurones reflètent à la fois les informations synaptiques traitées par ces neurones, mais aussi les propriétés des canaux ioniques que renferme leur membrane.

## Le passage du conscient à l'inconscient

Ce type d'étude, développée par le neurophysiologiste canadien né à Bucarest, Mircea Steriade (1924-2006), pour décrire les mécanismes neuronaux des différents états de vigilance et de l'épilepsie, est peu utilisé dans les laboratoires à cause de son extrême difficulté technique. Néanmoins, avec mes collègues, nous avons appliqué ce type d'approche expérimentale, combiné à la réalisation de cartes temps-fréquences, à l'étude des changements dynamiques




**2. UN ENREGISTREMENT EEG** *(d)* peut être décomposé après différents filtrages en plusieurs composantes de fréquence. Ainsi, le tracé brut *(d)* contient des ondes lentes *(a)*, des ondes delta *(b)* et des fuseaux *(c)*. L'amplitude de l'EEG reflète le nombre de neurones produisant simultanément des potentiels synaptiques. On constate que le tracé EEG *(d)*, qui est la somme de potentiels issus de milliers de neurones individuels, suit les fluctuations du potentiel enregistré par une électrode implantée dans un neurone particulier situé à proximité duquel a été réalisé l'électroencéphalogramme *(e)*.

## BIBLIOGRAPHIE


D. Tucker et M. Holmes, **Les crises de la conscience,** *Pour la Science*, n° 405, pp. 40-46, 2011.

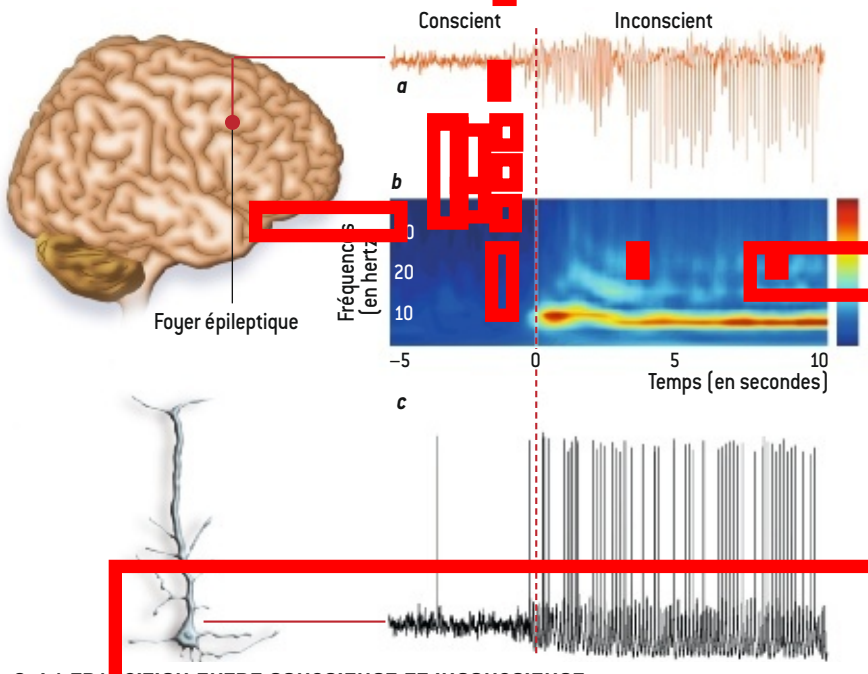
G Dumas *et al.*, **Inter-brain synchronization during social interaction,** *PLoS One*, vol. 17, 5(8):e12166, 2010.

P. Polack *et al.*, **Deep layer somatosensory cortical neurons initiate spike-and-wave discharges in a genetic model of absence seizures,** *J. Neurosci.*, vol. 27, pp. 6590-6 599, 2007.

M. Le Van Quyen et A. Bragin, **Analysis of dynamic brain oscillations : methodological advances,** *Trends Neurosci.*, vol.30(7), pp.365-373, juillet 2007.

**Electroencephalography : Basic principles, clinical applications and related fields,** E. Niedermeyer et F. Lopes da Silva (sous la direction de), Lippincott, Williams and Wilkins, 2004.

T. Bullock et E. Basar, **Comparison of ongoing compound field potentials in the brains of invertebrates and vertebrates,** *Brain Res*, vol. 472(1), pp. 57-75, 1988.




**3. LA TRANSITION ENTRE CONSCIENCE ET INCONSCIENCE** est suivie chez un rat atteint d'un type d'épilepsie nommé absence, une perte de conscience qui dure quelques secondes. On enregistre les ondes électriques corticales *(a)* et l'activité des neurones pris un à un dans la zone du foyer épileptique *(c)*. Le traitement mathématique de l'enregistrement du signal global (EEG) fournit une carte dynamique où l'on peut montrer comment les fréquences évoluent au cours du temps, ce que ne permet pas un examen visuel de l'EEG. On obtient ainsi une carte temps-fréquences qui indique les amplitudes relatives *(b, des moins intenses en bleu aux plus intenses en rouge)* des fréquences du signal EEG au cours de cette transition d'états de vigilance. Ainsi, dans ce cas, les fréquences proches de dix hertz prédominent au cours de la perte de conscience.

survenant chez le rat, dans les ondes EEG lors d'une crise d'épilepsie de type absence. Nous enregistrons l'EEG du rat et les variations de potentiel dans des neurones où sont implantées des électrodes. Ainsi, nous avons accès à l'activité des neurones et à l'activité cérébrale globale.

Ces expériences nous ont permis de mieux comprendre les mécanismes de genèse des crises, mais ont aussi révélé les mécanismes neurobiologiques qui sous-tendent une transition quasi instantanée entre un état conscient et un état inconscient. Les ondes EEG rapides et de faible amplitude, typiques de l'état conscient, sont associées à des potentiels synaptiques excitateurs rapides et de faible amplitude, dans les neurones corticaux enregistrés à proximité du foyer épileptique.

Rappelons qu'une crise d'épilepsie naît dans une région très limitée du cortex et qu'elle se propage comme une onde à partir de ce point. La crise se traduit par l'apparition brutale d'ondes électriques corticales de grande amplitude et de basse fréquence [illegible] breux neurones corticaux. L'analyse de différents enregistrements révèle la présence d'oscillations ayant une fréquence légèrement plus élevée juste avant le déclenchement de la crise. Ces ondes cérébrales et neuronales seraient un indice précoce de la [illegible]

## Les ondes cérébrales : un régulateur des interactions sociales ?

L'étude des ondes cérébrales et neuronales permet de mieux comprendre comment les ondes corticales naissent dans une région limitée du cortex et se propagent à grande distance. Mais elle permet de suivre aussi comment se passe le basculement de la conscience à l'inconscience. Si, depuis une vingtaine d'années, les neuroscientifiques ont fait des progrès remarquables dans la compréhension du fonctionnement du cerveau, il reste quelques pierres d'achoppement. Découvrir les bases neuronales de la conscience et mettre au jour celles de la pensée sont les deux principaux défis auxquels ils sont confrontés.

Les variations des ondes électriques cérébrales représentent les seules activités neuronales instantanément corrélées aux différents processus mentaux (états de vigilance, tâches cognitives). Elles pourraient donc constituer un substrat électrobiologique pour un processus d'« émergence » de la conscience à partir de l'activité neuronale. Dans le cadre de cette théorie, défendue par le neurophysiologiste Benjamin Libet (1916-2007) et le chercheur en sciences cognitives Francisco Varela (1946-2001), les interactions complexes des unités fonctionnelles (les neurones) du cerveau produiraient une dynamique globale (les ondes cérébrales) d'où émergerait l'activité mentale consciente. Autrement dit, l'activité globale du cerveau aurait une dimension supérieure à la simple somme des activités des neurones pris individuellement ou encore le tout aurait des propriétés supérieures à la somme des propriétés de ses constituants. On aurait ici un phénomène d'émergence (ou causalité descendante), la dynamique des neurones se combinant en une dynamique cérébrale globale plus riche.

Inversement, l'activité mentale elle-même agirait, par un mécanisme de rétroaction « descendante », sur les activités cérébrales : l'activité globale agirait localement sur telle ou telle aire responsable de telle ou telle capacité cognitive. Ces phénomènes de causalité réciproque, supérieurs aux simples corrélats neurobiologiques de la conscience – les réseaux de neurones –, semblent indiquer que les activités électriques du cerveau et les expériences conscientes s'influencent par une sorte d'empreinte réciproque, mais ils n'éclairent pas (encore ?) les mécanismes neurobiologiques d'émergence de la conscience.

Une récente étude réalisée par le groupe de Lionel Garnero (1955-2009), à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, a montré qu'au moment précis où un individu imite le mouvement de la main de quelqu'un d'autre, les ondes corticales de l'individu imitateur et celles de l'individu imité se synchronisent dans une gamme donnée de fréquences. Ainsi, les ondes cérébrales ont de multiples fonctions : elles déterminent l'état mental de l'individu (veille, éveil, conscience, etc.), elles contrôlent les fonctions cognitives, et on découvre qu'elles sous-tendraient les interactions sociales. Et elles détiennent sans doute le secret de l'émergence de la conscience et du contenu de la [illegible]


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# 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 dernières 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 courrier ou par courriel.

➤ **Soutenez la recherche et envoyez votre don* 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**

# Champs et ondes : quel impact sur la santé ?

Luc Verschaeve et Jacques Vanderstraeten

**L'examen des études épidémiologiques et expérimentales fiables n'indique pas d'effet causal avéré des champs et des ondes électromagnétiques sur la santé. Toutefois, la publication de résultats contradictoires entretient le doute dans la population.**

L'ig[illegible] lités, les idées reçues, entretiennent la rumeur et les craintes irrationnelles. Que penser quand on n'a pas de certitude, quand on n'a pas de réponse précise aux questions que l'on se pose, et qu'on lit des informations contradictoires ? Comme tout ce qui touche à l'impact de l'environnement sur la santé, la question des conséquences sur la santé des champs électromagnétiques fait débat. Si la nature des phénomènes en cause est complexe, l'interprétation des résultats des études scientifiques l'est tout autant. Non contente d'être complexe, cette question des effets sanitaires des champs électromagnétiques préoccupe le public du fait de la proximité et de l'omniprésence des sources d'exposition à ces champs.

Ces craintes sont-elles justifiées ou non ? Tout le débat tient en ces quelques mots. Le public s'interroge : quelles sont les études réalisées sur les effets potentiels des champs électromagnétiques sur la santé ? Les scientifiques publient-ils tous leurs résultats ? Les politiques bloquent-ils certains dossiers ? Pourquoi les médias se font-ils l'écho [illegible] de telle décision de ne pas implanter un [illegible] relais, voire de la retirer ? Si l'on en parle, c'est bien qu'il y a un problème. Si l'on n'en parle pas, c'est qu'« on » nous cache quelque chose...

Nous allons tenter ici de tirer les grandes lignes de ce que nous livrent les diverses études et les multiples publications dans ce domaine tout en évitant les nombreux écueils que nous analyserons. Nous insisterons sur les deux types de champs électromagnétiques qui préoccupent le plus la population : les champs magnétiques des lignes à haute tension et les radiofréquences qu'émettent les antennes relais de type GSM (*Global System for Mobile Communication*, ou système global pour communication mobile) et les systèmes de téléphonie et de télécommunication sans fil.

L'impact sur la santé des ondes électromagnétiques est étudié en recourant à deux approches complémentaires : d'une part, les études expérimentales (sur cellules ou animaux), mais les intensités utilisées dans ces tests sont généralement très supérieures à celles auxquelles nous sommes exposés et, d'autre part, les études épidémiologiques. Toutefois, ces dernières sont parfois critiquables en raison de la méthodologie mise en œuvre et parce que des études non comparables sont parfois traitées ensemble dans les mêmes études statistiques qui, dès lors, n'ont pas de sens. Toutefois, quand on connaît ces biais – et qu'on les évite –, on réussit à se faire une idée plus précise de l'impact sur la santé des ondes électromagnétiques et on peut tirer quelques conclusions. C'est ce que nous allons faire ici.

## Les lignes à haute tension

Une exposition importante aux champs électromagnétiques, et plus précisément aux champs magnétiques de très basses fréquences (de l'ordre de 50 hertz), peut produire des courants électriques dans l'organisme. Lorsque ces courants sont très intenses, ils peuvent provoquer des contractions musculaires incontrôlables ou des troubles du rythme cardiaque. Mais de tels effets ne peuvent apparaître pour les intensités des champs auxquels nous sommes exposés dans la vie quotidienne. Pour des intensités plus faibles, mais toujours beaucoup plus importantes que les intensités usuelles, ces courants peuvent déclencher l'apparition



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

de phosphènes : le sujet perçoit des taches lumineuses dans le champ visuel, mais à nouveau de telles intensités ne sont pas celles auxquelles on peut être exposé en conditions normales.

Outre ces effets liés au phénomène d'induction électromagnétique, des phénomènes indirects peuvent également se produire, telles les décharges électriques qui surviennent quand on entre en contact avec un objet conducteur porté à un potentiel plus élevé que celui de la Terre, et isolé de la terre. Aux intensités qui nous concernent, de telles décharges n'ont cependant aucune conséquence sur la santé.

Les effets des champs magnétiques de très basses fréquences (les lignes à haute tension) ont commencé à inquiéter le grand public après la publication, en 1979, de l'étude épidémiologique de Nancy Wertheimer et Ed Leeper, de l'Université du Colorado, à Denver, selon laquelle le risque de leucémie infantile serait plus élevé chez les enfants résidant à proximité des lignes à haute tension. Cette étude épidémiologique a été suivie de dizaines d'autres, ainsi que de centaines de travaux en laboratoire, mais les conclusions restent débattues.

On peut déduire des nombreuses études disponibles que ces champs magnétiques ne provoquent pas de cancers chez les animaux de laboratoire, mais qu'il existe une augmentation du risque de leucémie infantile chez les enfants qui sont exposés, sur le long terme, à des champs magnétiques dont l'intensité est comparable à celle qui existe à proximité des lignes à haute tension. Cette conclusion, publiée en 2000 par Anders Ahlbom et ses collègues de l'Institut Karolinska, à Stockholm, en Suède, et par Sander Greenland et ses collègues, de l'Université de Californie, à Los Angeles, repose sur les résultats de deux méta-analyses ayant rassemblé chacune une quinzaine d'études épidémiologiques réalisées sur cette question.

À la suite de ces publications et de l'évaluation de toutes les publications scientifiques sur ce sujet, le Centre international de la recherche sur le cancer, CIRC, a décidé de classer les champs magnétiques de très basses fréquences dans le groupe 2B, où sont rassemblés les agents potentiellement cancérogènes pour l'homme. Notons que l'analyse combinée des sept études réalisées depuis 2000 par Leika Kheifets et ses collègues, de l'Université de Californie

## L'ESSENTIEL

- De nombreuses informations, souvent contradictoires, circulent concernant l'impact, sur la santé, des champs et ondes électromagnétiques.
- On n'a pas mis en évidence d'augmentation des cancers chez les adultes vivant à proximité d'une ligne à haute tension.
- Quant aux ondes radiofréquences de la téléphonie mobile ou des antennes, aucun effet n'est avéré, mais les études à très long terme font encore défaut.
- Les seuls effets biologiques connus, les effets thermiques, ne se manifestent pas aux niveaux usuels d'exposition.

© Shutterstock/Shebono

## LES AUTEURS

Luc VERSCHAEVE fait partie de la Direction opérationnelle Santé publique et surveillance de l'Institut scientifique de santé publique de Bruxelles. Il est professeur de toxicologie à l'Université d'Anvers, en Belgique.

Jacques VANDERSTRAETEN est membre de la Cellule environnement de la Société scientifique de médecine générale, et collaborateur scientifique de l'École de santé publique de l'Université libre de Bruxelles.

Luc Verschaeve préside le groupe de travail Rayonnements non ionisants du Conseil supérieur de la santé belge, dont Jacques Vanderstraeten est également membre.

Site du Groupe belge BioElectroMagnetic, BBEMG : http://www.bbemg.ulg.ac.be


à Los Angeles, a abouti à la même conclusion que celle publiée en 2000. Ainsi, on n'a pas mis en évidence d'effet cancérogène des champs magnétiques de très basses fréquences chez l'adulte ni chez l'enfant, hormis un risque de leucémie.

Peut-on évaluer cette augmentation du risque de leucémie chez l'enfant ? Il est statistiquement corrélé à l'exposition aux champs magnétiques de très basses fréquences, et ce, à partir d'une intensité d'exposition de l'ordre de 0,4 microtesla, valeur retrouvée, par exemple, dans les habitations situées à proximité des lignes à haute tension. Pour autant, soulignons bien que si l'on a trouvé une corrélation entre ces deux données, on n'a pu mettre en évidence aucun lien de causalité : on n'a pas pu montrer que ce sont les lignes à haute tension qui expliquent l'augmentation du risque de leucémie chez l'enfant.

Si cette causalité était avérée, ces champs seraient responsables, d'après l'Institut de matériaux et de mesures de référence néerlandais, de un cas de leucémie infantile supplémentaire par an dans une population de 35 millions de personnes. Notons que [illegible] d'autres facteurs sont connus ou soupçonnés de favoriser la survenue d'une leucémie chez l'enfant, par exemple les radiations ionisantes, certaines infections, les pesticides, l'exposition à divers agents chimiques ou encore des facteurs de prédisposition génétique.

Ces champs magnétiques provoqueraient-ils d'autres effets sur la santé ? De nombreuses études ont été réalisées sur des cellules et des animaux de laboratoire. On y a recherché des effets autres que le déclenchement de cancers, mais les études n'ont pas révélé d'effets reproductibles. Dans l'ensemble, les études disponibles n'indiquent pas que les champs magnétiques de très basses fréquences perturbent la reproduction ou le développement des animaux (ou de l'homme), ni qu'ils puissent avoir un impact nuisible direct sur l'ADN, le patrimoine génétique de l'individu. En revanche, des incertitudes subsistent quant à une éventuelle potentialisation par ces champs de l'effet d'agents dont on sait qu'ils sont responsables de mutations ou qu'ils déclenchent des tumeurs.

Parmi les études réalisées sur des sujets humains, [illegible] sensibilité aux champs électromagné-

## LES EFFETS DES RADIOFRÉQUENCES EN FONCTION DE LA DOSE

Lorsque nous sommes exposés aux champs électromagnétiques radiofréquences, notre corps absorbe de l'énergie. La quantité d'énergie absorbée est fonction de différents facteurs tels que la densité de puissance, la fréquence, les vêtements que nous portons, etc.

Les radiofréquences peuvent provoquer des effets thermiques lorsque la hausse de la température corporelle est supérieure à un degré. Cet effet thermique est le seul que tous les scientifiques reconnaissent.

Dans le domaine des radiofréquences, on utilise le taux d'absorption spécifique, TAS, pour évaluer les doses. Ce taux correspond à l'énergie absorbée par unité de masse et de temps ; il s'exprime en watts par kilogramme. Il est égal au carré de la densité de courant ($i$) divisé par [illegible] du tissu exposé ($\rho$, exprimé en kilogramme par mètre cube) et par la conductivité électrique de ce tissu ($\sigma$, exprimée en siemens par mètre). Comme l'énergie absorbée, $E$, est égale à $i/\sigma$ :

$TAS = i^2/\sigma\rho$, ou $TAS = \sigma E^2/\rho$

Le taux d'absorption spécifique permet d'estimer l'augmentation de température ($\Delta T$) due à l'absorption de cette énergie :

$\Delta T = TAS \Delta t / c_{th}$

où $c_{th}$ est la capacité calorifique spécifique du tissu, exprimée en joules par kilogramme et par degré.

Shutterstock/Oleksiy Mark

L'absorption spécifique est donc une mesure de l'absorption d'énergie aussi bien qu'une mesure de l'augmentation de la température du tissu ou du corps exposé. Une augmentation de la température corporelle peut aisément expliquer la plupart des effets [illegible] dus aux champs électromagnétiques radiofréquences qu'utilise la téléphonie mobile.

Ce sont plutôt les effets non thermiques – sans augmentation de la température – qui font l'objet des débats sur les effets biologiques des ondes utilisées pour les téléphones portables. Aujourd'hui, la plupart des scientifiques reconnaissent la présence éventuelle d'effets non thermiques sans pour autant être convaincus de leur nocivité. C'est à tout le [illegible]

Pour évaluer les effets toxiques d'agents chimiques, les chercheurs utilisent souvent des doses élevées de la substance testée, afin de pouvoir déceler plus facilement d'éventuels effets. Ensuite, ils extrapolent les résultats obtenus avec des doses élevées aux faibles doses auxquelles nous sommes exposés.

Pour la téléphonie mobile, c'est impossible, car les mécanismes d'action (s'il en existent) seraient tout à fait différents. Et aujourd'hui, on sait que l'on ne peut extrapoler les résultats d'expériences correspondant à des « doses élevées », où les effets thermiques prédominent, aux expositions réelles non thermiques. Seules les expériences réalisées avec des « faibles doses » auraient un sens, mais c'est précisément le domaine où les résultats restent controversés. Les expériences ne sont pas en mesure de [illegible] que les champs électromagnétiques radiofréquences utilisés en téléphonie mobile sont nocifs pour la santé.




© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

ques *(voir l'encadré page 132)*, sur le système immunitaire, le sang, la mélatonine (une hormone), le système cardio-vasculaire ou encore le système nerveux central. Malgré quelques effets transitoires ou peu significatifs, la conclusion générale est qu'il n'y a pas de preuves que les champs magnétiques de très basses fréquences puissent provoquer des effets néfastes sur la santé aux niveaux auxquels nous sommes typiquement exposés dans notre environnement quotidien.

Pourtant, des données récentes pourraient indiquer l'existence d'un autre risque ignoré jusqu'à présent. Depuis quelques années, des publications scientifiques font en effet mention d'une augmentation possible, mais non encore confirmée à ce jour, de maladies neurodégénératives, telle la maladie d'Alzheimer, chez les personnes exposées aux champs magnétiques dans le cadre de leur profession ou chez les personnes habitant à proximité des lignes à haute tension. Il est encore trop tôt pour tenir compte de ces indications, mais elles imposent néanmoins une certaine vigilance, et la réalisation d'études complémentaires.

Ainsi, en ce qui concerne les lignes à haute tension, il existe un risque de leucémie infantile légèrement augmenté sans que le lien de cause à effet n'ait pu être établi et il faudra surveiller à l'avenir la prévalence des maladies neurodégénératives dans une [illegible]

## Les radiofréquences et la téléphonie mobile

Que peut-on dire d'une autre source de pollution électromagnétique : le radar, les ondes radio et télévision, les antennes relais, le téléphone mobile et le Wi-Fi, pour ne citer que quelques exemples d'applications permettant la transmission d'information par les ondes électromagnétiques ? Il s'agit ici de radiofréquences ou de micro-ondes. Les applications de ce type ne cessent de se multiplier, de sorte que l'exposition de la population aux champs électromagnétiques augmente.

Cette exposition aux fréquences radio (comme aux très basses fréquences) engendre une certaine anxiété, surtout si l'exposition est imposée et non volontaire. Cette anxiété est entretenue par des rapports scientifiques dont les contenus sont parfois controversés et discutables, tout autant que par des témoignages alarmistes et des discussions sans fin dans les médias. Dans le cas des radiofréquences, et plus encore que pour les champs électromagnétiques de très basses fréquences, il faut être très prudent quand on évalue les données scientifiques, notamment en raison d'une propriété fondamentale des radiofréquences (dont font partie les micro-ondes). En effet, contrairement aux champs électromagnétiques de très basses fréquences, les radiofréquences peuvent induire des effets thermiques dans un organisme exposé à des intensités de champ importantes.

Ces effets thermiques expliquent la plupart des effets biologiques recensés à ce jour. Ils résultent de l'augmentation de la température locale des tissus soumis à l'effet micro-ondes : la molécule d'eau est polaire, c'est-à-dire que ses charges électriques sont inégalement réparties. À la haute fréquence d'un four à micro-ondes, le dipôle ne peut suivre les oscillations imposées par le champ extérieur, à cause des frottements entre les molécules (dus aux liaisons hydrogène). Il s'ensuit un échauffement de l'eau. Divers mécanismes biochimiques en sont perturbés. Des mesures sont prises afin d'éviter une exposition à des champs d'une telle intensité. Ainsi, les fours micro-ondes modernes sont équipés de plusieurs systèmes de sécurité afin de minimiser les fuites.

Quant aux antennes émettrices (stations de base GSM) et toutes les autres sources d'émission de radio- ou de télécommunication (Wi-Fi, par exemple), elles exposent à des intensités trop faibles pour causer le moindre effet thermique. Si, comme nous l'avons évoqué, on connaît les effets biologiques d'intensités suffisamment fortes pour entraîner des effets thermiques sur des cellules ou sur des animaux, on ne peut pas extrapoler ces résultats aux situations d'exposition non thermiques auxquelles nous sommes confrontés au quotidien.

Pourtant, ce pas est souvent franchi, généralement par ignorance. Il faut sans cesse rester vigilant, car beaucoup d'études présentent des biais (défaut de dosimétrie biologique, nombre de sujets, d'animaux ou de cellules insuffisant pour que l'expérience soit statistiquement significative, etc.). En outre, aucune étude n'est à elle seule suffisante pour qu'on puisse la généraliser : comme pour tous les sujets de recherche, les résultats d'une étude doivent être confirmés

## ✔ BIBLIOGRAPHIE


R. Baan *et al.*, **Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields,** *Lancet Oncology*, vol. 12, pp. 624-626, 2011.

L. Kheifets *et al.*, **Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia,** *Br. J. Cancer*, vol. 103, pp. 1128-1135, 2010.

R. Stam, **Electromagnetic fields and the blood-brain barrier,** *Brain Res. Rev.*, vol. 65, pp. 80-87, 2010.

A. Perrin *et al.*, **Effects of radiofrequency field on the blood-brain barrier. A systematic review from 2005 to 2009,** *C. R. Compt. Rend. Phys.*, vol. 11, pp. 602-612, 2010.

*Interphone* Study Group, **Brain tumour risk in relation to mobile telephone use : results of the INTERPHONE international case–control study,** *Int. J. Epidemiol.*, vol. 39, pp. 675-694, 2010.

G. Rubin *et al.*, **Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (formerly electromagnetic hypersensitivity) : an updated systematic review of provocation studies,** *Bioelectromagnetics*, vol. 31, pp. 1-11, 2010.

A. Huss *et al.*, **Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases : longitudinal study of the Swiss population,** *Am. J. Epidemiol.*, vol. 169, pp. 167-175, 2009.

L. Kheifets *et al.*, **Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields : review and recommendations,** *Occ. Environ. Med*, vol. 66, pp. 72-80, 2009.

P. Zweiacker, **Vivre dans les champs électromagnétiques,** Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.

M. Crasson, **Sommes-nous sensibles aux ondes ?,** *Cerveau&Psycho*, n° 36, nov-déc. 2009.

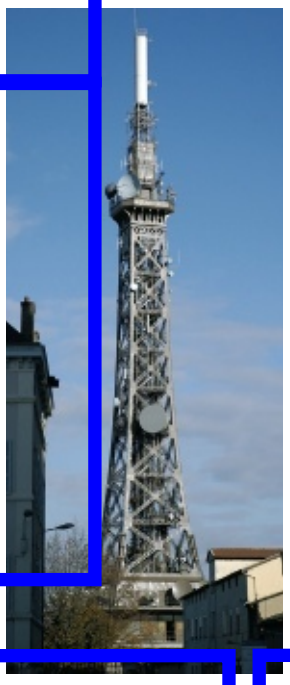
A. Garcia *et al.*, **Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease : a meta-analysis,** *Int. J. Epidemiol.*, vol. 37, pp. 329-340, 2008.

## LES PERSONNES ÉLECTROSENSIBLES

Un nombre croissant de personnes se plaint de symptômes non spécifiques qu'elles attribuent à une exposition aux champs électromagnétiques (lignes à haute tension, antennes GSM, etc.) et qui apparaissent à des niveaux d'exposition qui ne causent aucune réaction chez la majorité des personnes, et se situent très en dessous des recommandations internationales.

Dans certains cas, les personnes sont tellement affectées qu'elles s'isolent, sont contraintes de cesser de travailler et changent leur style de vie. D'autres personnes rapportent des symptômes moins graves, mais elles cherchent à éviter certaines sources de champs électromagnétiques. On parle souvent d'hypersensibilité à l'électricité, d'hypersensibilité électromagnétique ou encore d'intolérance idiopathique environnementale avec attribution aux champs électromagnétiques. Les symptômes peuvent être variés : maux de tête, accélération du rythme cardiaque, troubles digestifs, fatigue, picotements, etc.

Malgré un grand nombre d'études en laboratoire ou en



© Shutterstock/exa

double aveugle, cette hypersensibilité n'est toujours pas établie. La plupart des études sont négatives et ne permettent donc pas d'établir un lien causal, direct, entre les plaintes et l'exposition aux champs électromagnétiques.

Dans certains cas, il existe un effet nocebo manifeste, c'est-à-dire que ces personnes se sentent malades, parce qu'elles sont persuadées de la nocivité des champs auxquels elles sont exposées. Mais il serait imprudent de réduire toute plainte à un effet nocebo.

La plupart des études, dites de provocation, où l'on replace le sujet dans l'environnement supposé délétère, sont de courte durée et ne sont donc peut-être pas en mesure de mettre en évidence une réelle hypersensibilité. Un effet causal n'est donc pas établi, ce qui ne signifie pas qu'il faut pas prendre en compte les symptômes qui, eux, sont bien réels.

par d'autres. De surcroît, il faut pouvoir disposer d'études de différentes natures (épidémiologie, expériences en laboratoire sur des volontaires sains ou des personnes qui se disent sensibles aux ondes, sur des cellules et sur l'animal) et dans différents domaines de longueurs d'onde avant de pouvoir conclure quant à la présence ou à l'absence d'un effet biologique, quel qu'il soit.

En ce qui concerne les champs électromagnétiques de la téléphonie mobile, seuls les effets non thermiques, possibles mais très controversés, sont donc à prendre en considération. Malgré un très grand nombre d'études effectuées jusqu'à présent, les données actuelles ne permettent pas de formuler une conclusion définitive, comme l'ont montré différentes évaluations scientifiques. Les recherches réalisées *in vitro* ne permettent pas (pas plus qu'avec les champs électromagnétiques de très basses fréquences) d'identifier un mode d'action probable. Pourtant, les études portant sur le matériel génétique, la fonction immunitaire, l'expression des gènes et la production des protéines, le stress oxydatif, les voies de signalisation dans les cellules et l'apoptose (ou mort programmée des cellules) ne manquent pas !

Le même constat peut être formulé quant aux études faites sur l'animal. On recherche l'influence des ondes radiofréquences sur la durée de vie, le poids corporel ou l'apparition d'une maladie, notamment d'un cancer. La cinquantaine d'études effectuées jusqu'à présent sur ces différents aspects et publiées dans des revues scientifiques de qualité montre que le bilan global est très nettement en faveur d'une absence d'effets. Une petite centaine d'études a également été publiée sur les effets possibles des champs électromagnétiques sur la barrière hémato-encéphalique (un filtre très sélectif qui protège le cerveau contre d'éventuels agents pathogènes contenus dans le sang), mais dans l'ensemble les résultats n'ont pas permis de déceler d'effets significatifs, sauf quand les animaux sont exposés à des intensités tellement élevées qu'elles produisent des effets thermiques. C'est également le cas des études sur la fertilité, montrant que cette dernière est perturbée par les fortes intensités, génératrices d'effets thermiques.

Que dire du téléphone portable ? Plusieurs équipes ont fait des études épidémiologiques recherchant différents types de cancers du cerveau ou de la glande salivaire, puisque ce sont le cerveau et les zones voisines qui sont les plus exposés aux champs électromagnétiques quand on utilise son portable sans oreillette (notons que l'utilisation d'une oreillette éloigne la source des ondes radiofréquences du cerveau). Or ces études ont essentiellement fourni des résultats négatifs. Néanmoins, étant donné que l'introduction de la téléphonie mobile est relativement récente, il est trop tôt pour conclure quoique ce soit quant aux effets à long terme. En effet, les études portant sur l'utilisation du portable et présentant une durée importante (plus de dix ans) sont encore peu nombreuses et leur durée reste encore insuffisante pour que l'on puisse fournir des informations parfaitement fiables et définitives. Le cancer et les tumeurs bénignes du cerveau sont des maladies qui se développent très lentement, et seules des études portant sur une vingtaine d'années ou plus permettront de clore définitivement [illegible].

## Les recommandations relatives aux radiofréquences

Étant donné les préoccupations du public et le nombre important d'études sur les effets biologiques des radiofréquences, le Centre international de la recherche sur le cancer a considéré qu'il était temps de faire un bilan sur les risques cancérogènes des radiofréquences. À cette fin, une trentaine de scientifiques issus de 14 pays différents se sont réunis du 24 au 31 mai 2011 au siège du CIRC, à Lyon.

Toutes les études épidémiologiques ont été prises en compte, mais celles de Lennart Hardell, de l'Université d'Örebro, en Suède, et celles réalisées dans le cadre du projet *Interphone*, auxquelles des laboratoires de 13 pays différents ont participé, ont pesé davantage que d'autres dans les conclusions du groupe de travail. L'étude *Interphone* n'a pas montré de corrélation entre l'utilisation d'un téléphone mobile et un risque accru de cancers, mais les personnes les plus [illegible]



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

plus fréquemment atteintes d'un gliome cérébral que les personnes peu exposées. Dans le cas des personnes atteintes, la tumeur était plus souvent localisée du côté où le téléphone mobile était utilisé. Mais l'étude de ces résultats et de la façon dont ils ont été obtenus semble indiquer que certains d'entre eux proviennent de biais d'interprétation.

Quant aux études de L. Hardell, plus alarmistes, elles ont d'ores et déjà fait l'objet de critiques, car elles présenteraient des erreurs méthodologiques. Le groupe de travail du CIRC a néanmoins conclu que les résultats ne sont probablement pas uniquement dus à des biais ou des erreurs. C'est la raison pour laquelle il a considéré qu'un effet causal ne peut être totalement exclu à ce jour, tout au moins en ce qui concerne les gliomes et les neurinomes acoustiques. Les données pour les autres types de cancer (lymphomes, méningiomes etc.) ont été jugées insuffisantes pour que le CIRC rende un avis.

Le CIRC a donc classé les radiofréquences dans la catégorie 2B, c'est-à-dire celle des agents « peut-être cancérogènes pour l'homme », la même classification que celle des champs magnétiques de très basses fréquences. Rappelons que le café, la laine de verre ou le styrène sont d'autres exemples d'agents classés dans cette catégorie 2B. Cette classification est un signal important, mais il ne faut pas lui donner plus de signification qu'elle n'en mérite puisqu'elle indique que ces ondes sont des agents cancérogènes possibles, mais non pas probables.

## Quelles conclusions ?

Dans ce domaine où les résultats scientifiques – essentiellement négatifs, rappelons-le – s'accumulent au fil des années et où nous n'avons pas un recul suffisant pour avoir des études épidémiologiques tout à fait fiables, nous avons essayé de faire un état des lieux. Ainsi, les lignes à haute tension semblent indiquer une augmentation de leucémies infantiles de un cas pour une population de 35 millions de personnes, sans que la relation de cause à effet n'ait pu être démontrée. En ce qui concerne les radiofréquences, les intensités utilisées pour la téléphonie mobile ou pour les antennes relais sont insuffisantes pour produire le seul effet réellement connu qui pourrait être nocif, à savoir un effet thermique. Les méta-analyses des études fiables n'indiquent pas d'effet sur la santé. Toutefois, comme il est impossible de prouver une absence d'effet, et que le CIRC a classé les radiofréquences dans la catégorie des agents peut-être cancérogènes pour l'homme, on peut conseiller d'utiliser une oreillette et d'éviter l'usage du téléphone portable dans des zones où la réception est mauvaise, car, dans ces conditions, l'intensité de l'émission des ondes par le téléphone augmente.

Enfin, en ce qui concerne les enfants, beaucoup sont suivis et les résultats des études prospectives à long terme permettront de savoir si les ondes radiofréquences ont ou non un effet sur leur santé. Toutefois, les résultats ne seront pas disponibles avant... une vingtaine d'années. D'ici là, mieux vaut éviter que les jeunes enfants n'abusent du téléphone portable. Peut-être pourrait-on recommander de privilégier les SMS, car le téléphone est alors plus loin du cerveau...

# Comment on attribue les fréquences

Jean-Jacques Guitot

**Téléphonie mobile, télévision, radio, radars, Wi-Fi… Chaque service de radiocommunication émet dans une bande de fréquences précise. Leur attribution dépend de nombreux paramètres scientifiques, techniques… et économiques.**

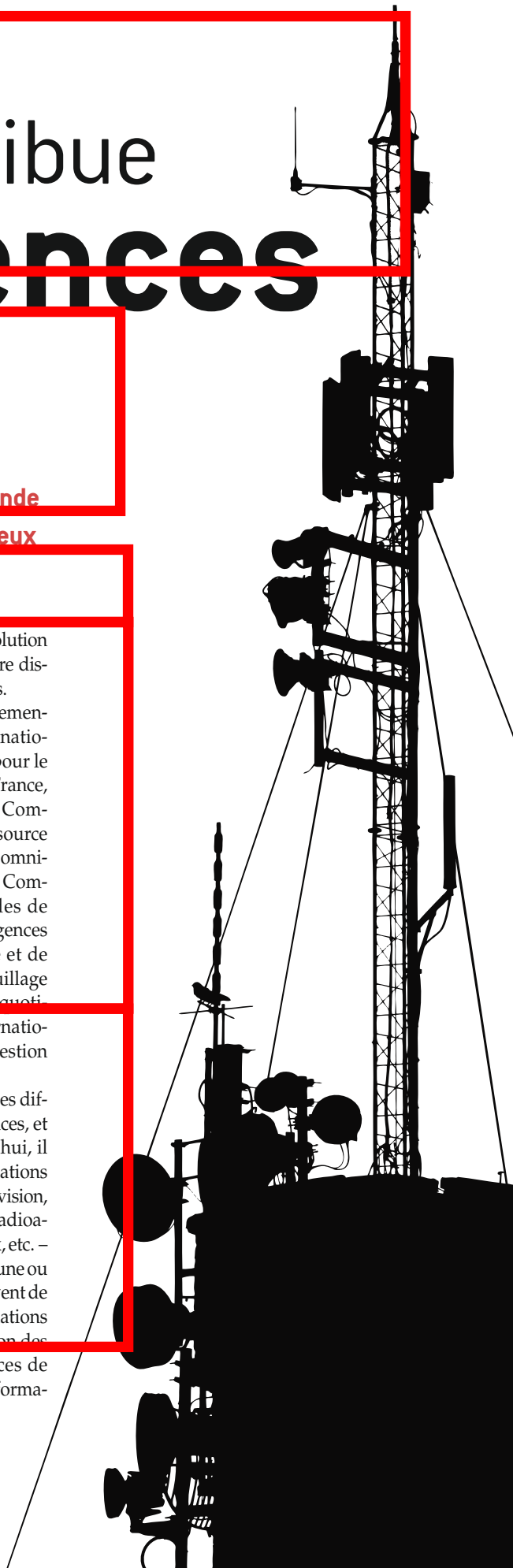
Le 15 [illegible], le gouvernement a ouvert la procédure d'attribution des licences de téléphonie mobile de quatrième génération (4G) en publiant au *Journal officiel* les arrêtés relatifs aux conditions d'attribution et d'utilisation de fréquences dans les bandes 2,6 gigahertz et 800 mégahertz en France métropolitaine. Ces fréquences serviront à déployer les réseaux de la prochaine génération de téléphonie mobile, lesquels permettront des connexions à très haut débit en mobilité – plusieurs dizaines de mégabits par seconde, contre un mégabit par seconde actuellement avec la génération 3G+ – avec un objectif de 100 mégabits par seconde d'ici quelques années.

Les prix de réserve fixés par l'État reflètent l'enjeu économique que représentent ces bandes de fréquences et la forte compétition qui oppose les opérateurs candidats aux attributions de blocs de fréquences: 700 millions d'euros pour la bande 2,6 gigahertz, et 1,[illegible] milliard d'euros pour la bande 800 mégahertz.

L'enjeu de l'accès au spectre est de taille en effet, car il s'agit d'une ressource limitée: selon la définition de l'Union internationale des télécommunications, les ondes radioélectriques sont des ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace sans guide artificiel et, par convention, de fréquence inférieure à 3 000 gigahertz. Avec l'explosion des moyens de radiocommunications de tous types et malgré l'évolution des techniques, les fréquences encore disponibles et exploitables se font rares.

L'utilisation du spectre est réglementée: il s'agit d'une ressource internationale, et chaque État est souverain pour le spectre utilisé sur son territoire. En France, il appartient au domaine public. Comment optimiser l'usage de cette ressource naturelle, collective, permanente et omniprésente au bénéfice de la société? Comment intégrer de nouveaux modes de communication répondant aux exigences actuelles de débit, de couverture et de cohérence internationale, sans brouillage des signaux? Tel est le casse-tête quotidien des diverses institutions internationales et nationales chargées de la gestion de cette ressource.

Pour comprendre les enjeux et les difficultés de l'attribution des fréquences, et la façon dont elle s'opère aujourd'hui, il faut savoir que la plupart des applications de radiocommunication – radio, télévision, communication en mer, défense, radioamateurisme, alarmes, implants médicaux, etc. – fonctionnent sur le même principe: une ou plusieurs ondes dites porteuses servent de support de transmission des informations *(voir l'encadré page 136)*. La régulation des fréquences porte sur les fréquences de ces ondes porteuses et non sur l'information transmise.



En pratique, les attributions de fréquences pour les radiocommunications ne portent pas sur des fréquences pures, mais sur des canaux constitués de bandes du spectre dont la position et la largeur dépendent des propriétés physiques des ondes et des contraintes liées à l'[illegible]

## Des contraintes physiques

Dans un premier temps, on attribue des bandes de fréquences aux services de radiocommunication, c'est-à-dire aux différents types de radiocommunication (mobile terrestre, mobile par satellite, radiodiffusion, trafic maritime, amateur, etc.), en fonction de leurs objectifs. Le spectre des fréquences radioélectriques ne présente pas les qualités homogènes : selon sa fréquence, une onde se propage par voie directe, par réflexion ou par diffraction, et sa propagation dépend de l'environnement. Les atténuations de propagation sont plus importantes lorsque la fréquence s'élève, favorisant ainsi la densification des stations d'émission. Enfin, la réception de l'onde peut être perturbée par les bruits parasites naturels et industriels, qui varient dans le spectre des fréquences. Certaines régions du spectre sont ainsi moins propices que d'autres à l'exploitation de certains services de radiocommunication selon les caractéristiques de l'usage recherché : type d'information véhiculé (voix, vidéo, données), degré de mobilité souhaité (fixe, nomade, mobile), technique de traitement du signal, couverture géographique…

Par exemple, entre 30 mégahertz et 6 gigahertz, les réflexions des ondes porteuses sur les obstacles deviennent négligeables devant les diverses atténuations dues à la propagation et aux bruits radioélectriques naturels ou industriels. Cela en fait une portion très demandée. Mais plus la fréquence est élevée, plus les obstacles perturbent et atténuent le signal. Les bandes entre 300 mégahertz et 3 gigahertz sont donc les plus recherchées pour la télévision, la radiotéléphonie cellulaire de deuxième (norme GSM), troisième et quatrième (normes UMTS et LTE) générations, la radiotéléphonie professionnelle (police, pompiers, ambulances, taxis, transports publics…) ou encore les communications aéronautiques et militaires. Mais ces bandes contiennent aussi les radars, les systèmes de navigation GPS et *Galileo*, le système mondial de détresse et de sécurité en mer, les radioamateurs ainsi que l'exploration de la Terre par satellite ou la radioastronomie (*voir la figure 2*).

Dans un deuxième temps, à l'intérieur des bandes attribuées à chaque service de radiocommunication, des canaux sont assignés aux diverses applications (telle la 4G dans le service mobile terrestre), en tenant compte de la largeur de bande occupée. Celle-ci dépend notamment du signal et du débit de l'application à transmettre, de la puissance rayonnée, du gain de l'antenne, de la polarisation de l'onde transmise.

Aujourd'hui, on distingue 19 services de radiocommunication terrestre, 26 par satellite, chaque service pouvant regrouper plusieurs applications différentes (par exemple, dans le service de radiodiffusion, on trouve la radio sonore, la télévision analogique et la télévision numérique). Plusieurs services pouvant par ailleurs se partager la même bande de fréquences, l'attribution des fréquences peut vite devenir un casse-tête, d'autant qu'outre l'industrie des télécommunications, elle implique nombre d'acteurs publics et privés tels que l'État, les autorités administratives indépendantes (le Conseil supérieur de l'audiovisuel et l'Autorité de régulation des postes et des communications électroniques), ainsi que les collectivités territoriales et, bien sûr,

### L'ESSENTIEL

- Le spectre des ondes radio est une ressource limitée.
- Les contraintes techniques restreignent le spectre exploitable pour la télécommunication.
- Or les services de radiocommunication se multiplient.
- Pour repousser ces limites, la régulation de l'attribution des fréquences, gérée conjointement aux échelles internationale et nationales, intègre en permanence les nouveaux paramètres scientifiques, techniques, économiques et sociaux.

© Shutterstock/Hal_P

**1. DEPUIS UNE TRENTAINE D'ANNÉES,** les radiocommunications explosent et saturent le spectre des ondes radio – en témoigne la forêt d'antennes qui peuplent les toits. Comment gérer au mieux l'attribution des radiofréquences pour suivre ces innovations tout en garantissant une réception équitable des informations ?

L'AUTEUR

**Jean-Jacques GUILLOT** est responsable du Département planification et prospective au sein de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

## ✔ BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Chaduc, **La gestion des fréquences,** Hermès Science, 2005.

**Rapport annuel 2010 du Conseil supérieur de l'audiovisuel,** CSA, 2011. www.csa.fr/rapport2010/

**Organisation et évolution de la gestion du spectre.** Rapport du groupe de travail du conseil d'administration de l'Agence nationale des fréquences, 2008. www.anfr.fr

**Fréquences : vers une flexibilité harmonieuse,** *La lettre de l'Autorité*, n°46, 2005. www.arcep.fr

## ✔ SUR LE WEB

les usagers. Afin d'optimiser la gestion de la ressource hertzienne, des réglementations techniques normalisent les conditions d'émission et de réception.

## Une gestion mondiale et nationale

La gestion des fréquences se fait à différents niveaux : global dans le cadre de l'Union internationale des télécommunications et local autour de l'Agence nationale des fréquences. Le niveau national donne le cadre juridique aux utilisateurs de fréquences. L'Europe impose les directives sur la libre circulation des terminaux et sur l'harmonisation de l'utilisation du spectre.

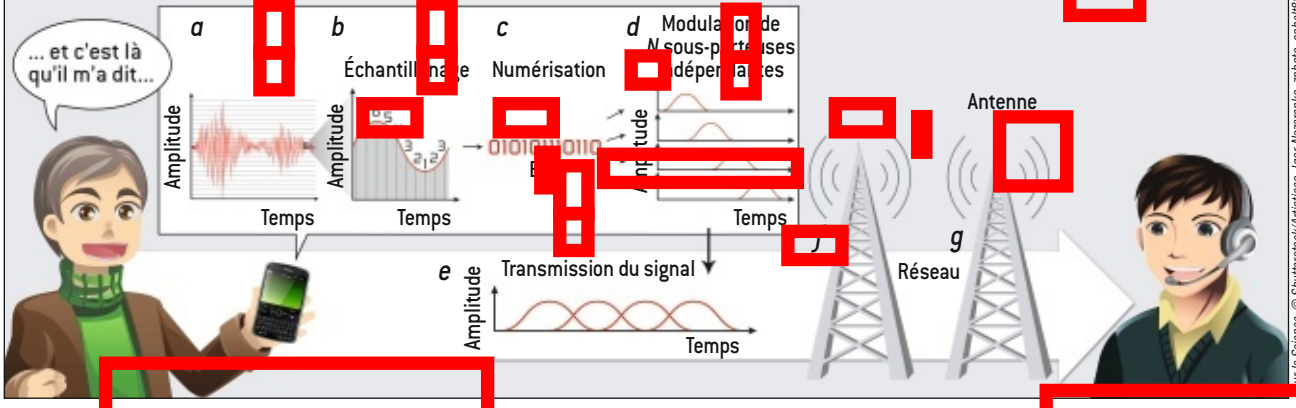
La coordination internationale des fréquences est un impératif. Non seulement les ondes ne connaissent pas les frontières, mais les utilisateurs d'équipements radioélectriques s'attendent à pouvoir les utiliser partout. Les règles d'attribution, de partage et d'harmonisation des fréquences se décident à l'Union internationale des télécommunications. En Europe, elles sont préparées au sein de la Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications, qui regroupe 48 administrations européennes, au-delà des pays membres de l'Union européenne. Par ailleurs, l'Union met en place un programme politique pluriannuel qui assurera la coordination entre les États membres et l'utilisation efficace du spectre, afin de doper la croissance économique sur tout le territoire de l'Union européenne.

Cette organisation a permis de développer les technologies numériques : téléphonie mobile de deuxième (GSM) et troisième (UMTS) générations, téléphonie sans fil (DECT), radiocommunication numérique professionnelle (TETRA) et radiodiffusion sonore (T-DAB), télévision numérique terrestre (DVB-T), transmission entre antennes fixes (faisceaux hertziens), appareils de faible puissance tels les implants médicaux, ou encore *Galileo*, l'équivalent européen du GPS.

Le Règlement des radiocommunications, qui coordonne la gestion des fréquences à l'échelle mondiale, est revu tous les quatre ans au cours de conférences mondiales (la prochaine aura lieu en 2012). Il engage les États : après une analyse prenant en compte l'évolution des connaissances scientifiques et techniques, chaque administration propose des modifications du règlement. Les membres de l'Union internationale des télécommunications évaluent ces mesures, qui une fois approu-

## COMMENT UN TÉLÉPHONE MOBILE TRANSMET VOTRE VOIX

Lors d'une conversation par téléphonie mobile, l'onde acoustique de la voix (de fréquence de l'ordre du kilohertz) subit plusieurs transformations dans le téléphone mobile afin d'être transmise à l'antenne la plus proche de l'opérateur. Elle est transformée [illegible] magnétique *(a)*, échantillonnée [illegible] à intervalles de temps réguliers. Un nombre est attribué à l'amplitude de l'onde [illegible] numérisée (*c*, chaque nombre étant codé en bits) au fur et à mesure. Après leur constitution, les bits modulent en amplitude une onde porteuse de fréquence de l'ordre du gigahertz. Dans le cas de la téléphonie 4G, l'onde porteuse est constituée [illegible] sont suffisamment éloignées les unes par rapport aux autres pour être indépendantes *(d)*. Au moment de leur codage, plusieurs bits (un bloc de bits) modulent une sous-porteuse, puis la suivante, etc. Le signal transmis est une onde porteuse constituée de l'ensemble de ces sous-porteuses modulées *(e)*. Nommée OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), cette technique [illegible] facteur fixé par rapport aux techniques de la génération 3G, mais réduira les erreurs de reconstitution du signal en garantissant un écart suffisant entre les blocs de bits sur une même sous-porteuse. Émise par l'antenne du téléphone, l'onde porteuse modulée est détectée par une antenne de l'opérateur *(f)*, transmise *via* son réseau à l'interlocuteur *(g)*, puis démodulée par le téléphone récepteur, qui restitue alors l'onde acoustique de la voix.




© Pour la Science, © Shutterstock/Artisticco, Igor Nazarenko, zphoto, cobalt88, Maluson, Christoph Seiths



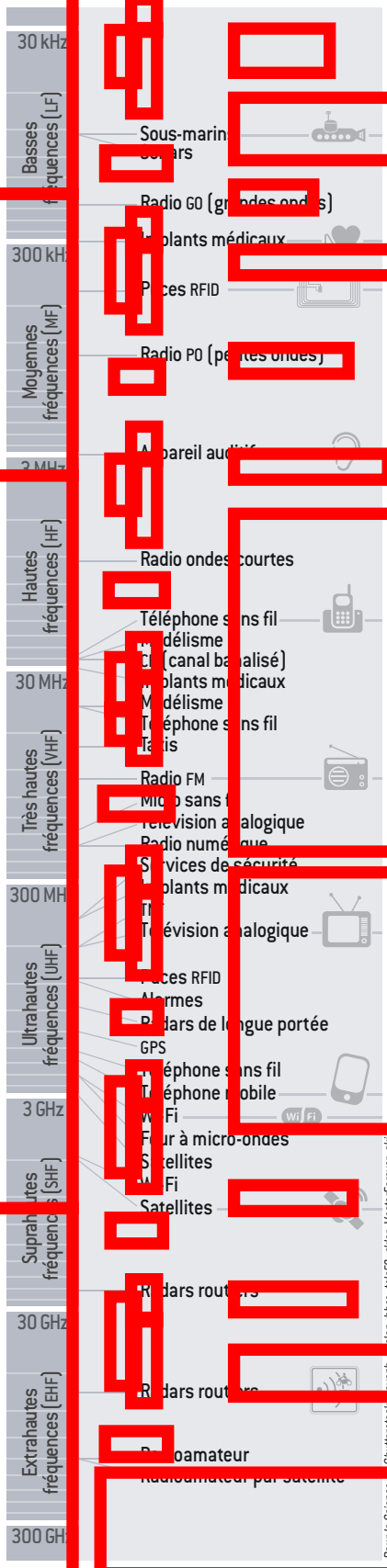
© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

vées, sont appliquées dans chaque État. Par ailleurs, l'Union internationale des télécommunications organise des conférences régionales afin de définir de façon équitable les ressources spectrales attribuées à chaque pays. La dernière conférence de ce type, en 2006, a ainsi fixé le cadre pour la planification de la télévision numérique terrestre dans certaines régions du monde.

Les planifications des bandes de fréquences doivent tenir compte des systèmes existants ou envisagés dans les autres bandes. Par exemple, un groupe de travail de l'Union internationale étudie le réaménagement, au profit du service mobile, de la bande 790-862 mégahertz, nommée dividende numérique, rendu possible par le passage de la télévision analogique à la télévision numérique.

En France, le spectre des fréquences radioélectriques appartenant au domaine public, l'État a la responsabilité de le gérer, d'en planifier et d'en contrôler les usages. Ces missions ont été confiées à l'Agence nationale des fréquences en collaboration avec les affectataires de portions du spectre. Ces affectataires sont des autorités administratives indépendantes : Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA), Autorité de régulation des postes et des communications électroniques (ARCEP), ministères (défense, intérieur, aviation civile, météorologie, espace, recherche), ainsi que les autorités représentant l'État dans les collectivités d'outre-mer. Elles ont la responsabilité d'assigner les fréquences, c'est-à-dire de donner les autorisations pour leur utilisation, selon les conditions fixées par l'Union internationale. L'ARCEP gère ainsi les autorisations d'utilisation des fréquences pour la future génération de réseaux de haut débit mobile (4G). L'aviation civile, quant à elle, autorise les fréquences des communications aéronautiques, des radars, etc.

En fonction des services de radiocommunication, la répartition des fréquences entre les affectataires est fixée par le Tableau national de répartition des bandes de fréquences et fait l'objet d'un arrêté du premier ministre. Cette répartition évolue en fonction des demandes des secteurs marchand et non marchand. Les changements d'affectation de bandes de fréquences se font à l'occasion de l'introduction de nouvelles technologies, telle la télévision numérique, ou à la suite de décisions à l'échelle nationale ou mondiale.




Pour la Science, Shutterstock, pyanh, develop, hbas, tele52, ekler, VectorForever, skia

**2. LE SPECTRE DES ONDES RADIO** est largement exploité par nombre de services de télécommunication, dont les principaux sont représentés ici.

Ces changements entraînent parfois des réaménagements, lesquels sont, si nécessaire, facilités par des mécanismes de compensation financière à travers le Fonds de réaménagement du spectre, géré par l'Agence nationale des fréquences. Les réaménagements s'accompagnent souvent de travaux importants et coûteux – addition de systèmes de filtrages, modification de modulation ou remplacement d'équipements fonctionnant sur d'autres fréquences – voire d'une remise en cause de l'organisation ou des missions des opérateurs libérant les fréquences.

## Densifier l'utilisation du spectre

La quatrième génération de téléphonie mobile sera opérationnelle en France en 2012. Des améliorations de cette génération sont déjà envisagées, et la cinquième génération est évoquée. Les innovations s'y prêtant, les usages évoluant, la demande de disponibilité en fréquences est toujours croissante. Si autrefois la gestion du spectre a consisté à définir des règles de partage des fréquences selon des critères de séparation géographique, les réflexions actuelles visent à optimiser ce partage. D'un point de vue technique, on cherche à augmenter le nombre de services de radiocommunication dans une même bande de fréquences en introduisant des méthodes d'accès dynamique et opportuniste à cette bande (partage temporel ou fréquentiel de la bande). Des méthodes fondées sur des considérations économiques sont aussi envisagées pour densifier l'utilisation des fréquences, telles l'ouverture de marchés secondaires (revente, par des exploitants, de portions de leur spectre) ou la vente aux enchères de bandes libérées.

Néanmoins, la gestion du spectre hertzien est une activité de long terme. Les activités et les pratiques évoluent. Si aujourd'hui la téléphonie mobile est au cœur des discussions, nombre d'autres réflexions sont en cours. L'Union internationale des télécommunications a ainsi inscrit à l'ordre du jour de sa prochaine conférence mondiale 25 demandes d'utilisation de fréquences, allant des besoins de fréquences pour assurer la sécurité d'exploitation des systèmes d'aéronef sans pilote jusqu'à l'utilisation par les services passifs (météorologie, exploration passive de la Terre par satellite) des fréquences comprises entre 275 et 3 000 gigahertz. ■

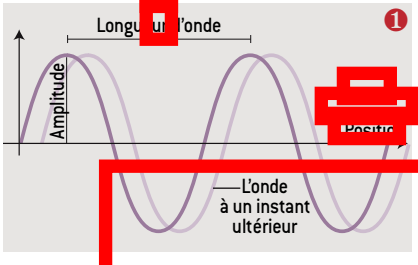
# Mémento des ONDES

Les ondes, sous leurs nombreuses formes, constituent un aspect essentiel de la réalité physique. En voici les principales notions et un panorama.

## NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

Le terme ONDE désigne en général la propagation de proche en proche, à une vitesse finie, de la perturbation d'une certaine grandeur physique (déplacement transversal dans le cas d'une corde vibrante, variation de la hauteur de l'eau dans le cas d'une onde à la surface d'un lac, amplitude et direction du vecteur champ électrique ou magnétique dans le cas d'une onde électromagnétique, etc.).

Une situation répandue et importante sur le plan théorique est celle où la grandeur qui se propage oscille de façon sinusoïdale ; dans ce cas, on parle d'ONDE SINUSOÏDALE ou d'ONDE MONOCHROMATIQUE. Une telle onde se caractérise principalement par sa longueur d'onde ou sa fréquence, son amplitude, sa vitesse et sa direction de propagation.



❶

L'AMPLITUDE $A$ de l'onde sinusoïdale est le maximum, en valeur absolue, atteint par la grandeur qui oscille. Selon le contexte, le même terme désigne parfois la valeur algébrique $a(r, t)$ de cette grandeur à un instant $t$ et en un point $r$ donnés.

La LONGUEUR D'ONDE $\lambda$ (lettre grecque *lambda*) est la distance minimale qui sépare, le long de la direction de propagation, deux points se trouvant dans exactement le même état d'oscillation à tout instant.

La FRÉQUENCE $\nu$ (lettre grecque *nu*) est, en chaque point, le nombre d'oscillation par unité de temps.

La PULSATION $\omega$ (lettre grecque *oméga*) désigne la quantité $\omega = 2\pi\nu$ ; elle est parfois abusivement appelée aussi fréquence.

La PÉRIODE $T$ est la durée d'un cycle d'oscillation. Fréquence et période sont inverses l'une de l'autre : on a $\nu = 1/T$. Et si l'on note $c$ la vitesse de propagation de l'onde, on a $\lambda = cT$.

Le VECTEUR D'ONDE est le vecteur $\boldsymbol{k}$ qui a pour norme (ou longueur) $k = 2\pi/\lambda$ et qui est dirigé dans le sens de la propagation. Le NOMBRE D'ONDE désigne en général le nombre $1/\lambda$, c'est-à-dire le nombre de longueurs d'onde contenues dans une unité de longueur.

À une dimension, on peut représenter une onde sinusoïdale se propageant le long de l'axe $Ox$, dans le sens positif de cette direction, par l'expression :

$$a(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \phi).$$

La PHASE $\phi$ (lettre grecque *phi*) est un angle qui caractérise le décalage (dans le temps ou l'espace) des états d'oscillation entre l'onde sinusoïdale considérée et une onde identique mais qui atteint son amplitude positive maximale à l'instant $t = 0$ et pour l'abscisse $x = 0$. Le décalage entre deux ondes sinusoïdales semblables $A \cos(\omega t - kx + \phi)$ et $A' \cos(\omega t - kx + \phi')$ est caractérisé par leur DÉPHASAGE $\Delta\phi = \phi' - \phi$.

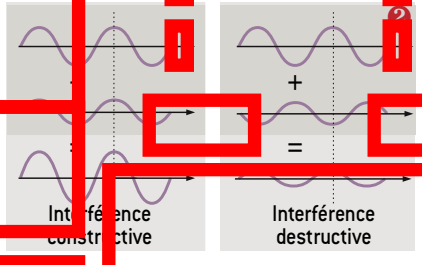
Une onde de forme (spatiale ou temporelle) quelconque peut être assimilée à la somme d'un nombre fini, d'une infinité dénombrable ou d'une infinité continue d'ondes sinusoïdales de fréquences et amplitudes différentes. La composition en fréquences correspondante définit son SPECTRE.

## INTERFÉRENCES ET ONDES STATIONNAIRES

Lorsque deux ondes $a_1(r, t)$ et $a_2(r, t)$ se propagent dans une même région de l'espace, leur superposition crée des INTERFÉRENCES ❷. Si les amplitudes des ondes ne sont pas trop élevées, on est dans un régime dit linéaire (cas classique) et les deux ondes s'additionnent : en chaque point $r$ et à tout instant $t$, l'onde résultante $a(r, t)$ est égale à la somme des deux ondes :

$$a(r, t) = a_1(r, t) + a_2(r, t).$$

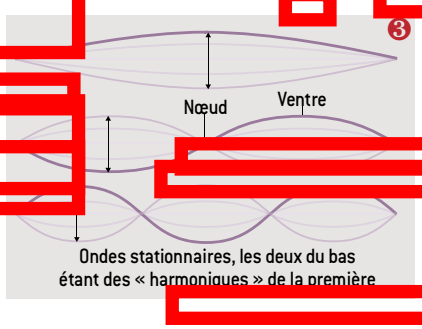
C'est le PRINCIPE DE SUPERPOSITION LINÉAIRE.



❷

Pour deux ondes sinusoïdales de même fréquence se propageant à la même vitesse et dans le même sens, on a INTERFÉRENCE CONSTRUCTIVE si les deux ondes sont en phase (déphasage nul, les amplitudes s'ajoutent) et INTERFÉRENCE DESTRUCTIVE si les deux ondes sont en opposition de phase (déphasage égal à $\pi$, les amplitudes se soustraient).

Lorsqu'une onde sinusoïdale s'ajoute à une onde identique, mais se propageant dans le sens opposé, le résultat est une ONDE STATIONNAIRE ❸ :
si $a_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$
et $a_2(x, t) = A \cos(\omega t + kx)$,
alors $a(x, t) = a_1(x, t) + a_2(x, t) = 2A \cos kx \cos \omega t$.



❸


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

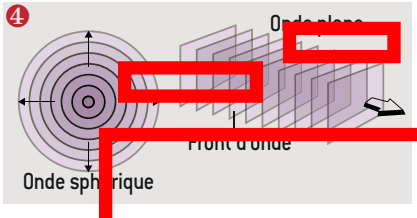
L'amplitude de l'oscillation, égale à $2A \cos kx$, varie périodiquement selon la position. Les positions $x$ pour lesquelles cette amplitude est nulle sont les **NŒUDS** de l'onde stationnaire ou de l'oscillation ; les positions $x$ pour lesquelles l'amplitude est maximale en valeur absolue sont les **VENTRES** de l'onde stationnaire. Par opposition à une onde stationnaire où il n'y a pas de propagation, une onde ordinaire est qualifiée d'**ONDE PROGRESSIVE** ou **PROPAGATIVE**.

Plus généralement, à une ou plusieurs dimensions, une onde stationnaire correspond à une oscillation de la forme $a(r, t) = A(r)B(t)$, où $B$ est une fonction sinusoïdale du temps $t$. La fonction $A(r)$ indique comment l'amplitude de l'oscillation varie dans l'espace. La fréquence d'oscillation et la répartition des nœuds et des ventres, spécifiée par la fonction $A(r)$, définissent le **MODE D'OSCILLATION** du système considéré. Une onde stationnaire est en général créée par une onde se propageant dans un espace limité (une cavité par exemple) et qui est piégée à l'intérieur de cet espace.

## ONDES PLANES OU SPHÉRIQUES

Pour une onde sinusoïdale se propageant dans l'espace à trois dimensions, les **FRONTS D'ONDE** sont les surfaces formées des points où la phase de l'onde est identique. Pour une **ONDE PLANE**, dont les caractéristiques sont les mêmes sur chaque plan perpendiculaire à l'axe de propagation, les fronts d'onde sont des plans. Pour une **ONDE SPHÉRIQUE** émise par un point central, les fronts d'onde sont des sphères centrées sur ce point ❹.

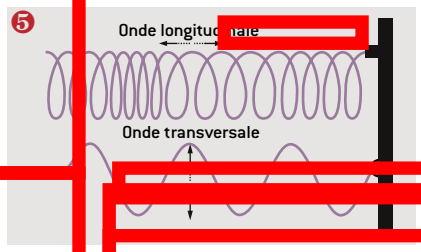
❹




## ONDES TRANSVERSALES ET POLARISATION

On parle d'**ONDES LONGITUDINALES** lorsque la grandeur qui oscille est un vecteur de même direction que l'axe de propagation, et d'**ONDES TRANSVERSALES** quand ce vecteur est perpendiculaire à l'axe de propagation ❺. Dans le cas d'ondes transversales, la direction du vecteur oscillant définit la **POLARISATION** de l'onde : si ce vecteur a une direction fixe, on a une **POLARISATION LINÉAIRE** ; si le vecteur tourne autour de l'axe de propagation, on a une **POLARISATION CIRCULAIRE**, gauche ou droite selon le sens de rotation.

❺

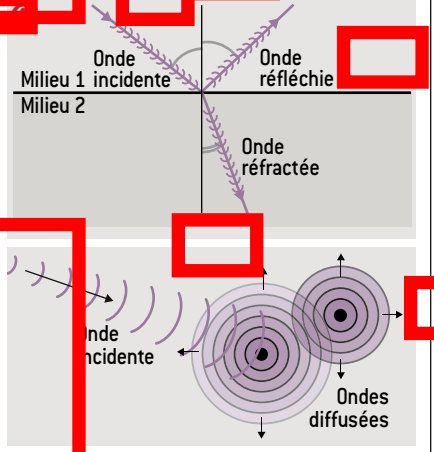



## RÉFLEXION, RÉFRACTION, DIFFUSION, ETC.

Une onde incidente peut être réfléchie à l'interface de deux milieux différents. Cette **RÉFLEXION** a lieu avec un angle symétrique de l'angle d'incidence et dans le plan contenant l'axe d'incidence et la perpendiculaire à l'interface. L'onde incidente peut aussi traverser l'interface en étant déviée : c'est la **RÉFRACTION** ❻. L'angle de réfraction dépend de l'angle d'incidence et des indices de réfraction des deux milieux. L'**INDICE DE RÉFRACTION** est le rapport $c/v$, où $c$ est la vitesse de l'onde dans le vide (ou dans l'air) et $v$ cette vitesse dans le milieu matériel. La vitesse de propagation de l'onde, donc l'indice de réfraction, dépend en général de la fréquence de l'onde. Pour une onde formée de plusieurs composantes monochromatiques, ces dernières se propagent donc à des vitesses différentes ; c'est le phénomène de **DISPERSION**.

Lorsqu'une onde rencontre, sans être absorbée, un objet de taille proche de la longueur d'onde ou plus petit, elle est généralement envoyée dans de multiples directions : c'est la **DIFFUSION**. Une diffusion par un ensemble de particules disposées aléatoirement brouille la cohérence ondulatoire. Dans d'autres cas (diffusion par les atomes ordonnés d'un cristal, diffusion par les bords d'un trou de forme régulière, etc.) cette cohérence se maintient et l'on a alors des interférences ou de la **DIFFRACTION**.

❻




## ONDES ÉLASTIQUES DANS UN LIQUIDE

Si, dans un milieu matériel, les atomes ou molécules soumis à un déplacement subissent une force qui les ramène vers leur position d'équilibre, on parle d'élasticité. Une **ONDE ÉLASTIQUE** se propageant dans un liquide ou un gaz correspond à la propagation d'une variation locale de pression ; on la qualifie d'**ONDE ACOUSTIQUE**. C'est une onde longitudinale, l'oscillation des atomes ou molécules autour de leurs positions d'équilibre s'effectue dans la direction de propagation. Les ondes acoustiques perçues par l'oreille humaine sont les **ONDES SONORES** ; leurs fréquences vont de 20 à 20 000 hertz environ. Les **ULTRASONS** ont des fréquences supérieures, les **INFRASONS** des fréquences inférieures. Les **HYPERSONS** ont une fréquence supérieure au gigahertz. Le *la* du diapason correspond à une fréquence de 440 hertz ; les sons graves vont jusqu'à 500 hertz environ, et commencent à quelque 4 000 hertz.

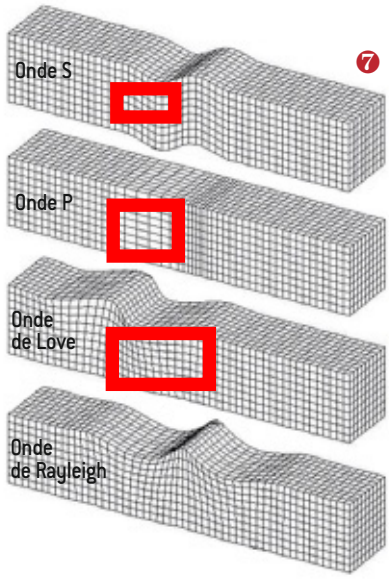
## ONDES ÉLASTIQUES DANS UN SOLIDE

Dans un solide, une onde élastique est en général à la fois une **ONDE DE COMPRESSION** et une **ONDE DE CISAILLEMENT** (le cisaillement est une force tangentielle qui s'exerce entre deux surfaces solides ou liquides en déplacement relatif). Dans le contexte géologique, une onde élastique est appelée **ONDE SISMIQUE**.

Il existe plusieurs types d'ondes sismiques ❼. Elles se propagent à des vitesses de quelques kilomètres par seconde, qui dépendent du milieu traversé et du type d'onde. Celles qui se propagent dans le volume de la Terre sont dites **ONDES DE VOLUME**. Il s'agit des ondes P et des ondes S : les **ONDES P** (pour *primaires*) sont les ondes de compression, les **ONDES S** (pour *secondaires*) les ondes de cisaillement. Les **ONDES DE SURFACE** se propagent uniquement à la surface de la Terre. Elles regroupent les **ONDES L** et les **ONDES DE LOVE**, sont des ondulations horizontales

du sol. Les ondes R, ou **ONDES DE RAYLEIGH**, sont des ondulations verticales.

Les **ONDES DE LAMB** sont des ondes qui se propagent dans des plaques solides dont la matière effectue un mouvement soit perpendiculaire à la plaque, soit dans la direction de la propagation.



7

## ONDES OCÉANIQUES ET ATMOSPHÉRIQUES

Une **ONDE DE GRAVITÉ** est une onde à la surface d'un fluide soumis à la gravité, où le fluide oscille verticalement. Les vagues à la surface de l'eau sont des ondes de gravité.

En météorologie, les **ONDES DE GRAVITÉ (ATMOSPHÉRIQUES)** sont des ondes de densité ou de pression créées par la poussée d'Archimède, qui tend à soulever les masses d'air moins denses. Les **ONDES DE ROSSBY** et les **ONDES DE KELVIN** sont deux types d'ondes de gravité (océaniques ou atmosphériques) d'échelle planétaire, où intervient la force de Coriolis due à la rotation de la Terre.

Les ondes de gravité ne doivent pas être confondues avec les **ONDES GRAVITATIONNELLES** : ces dernières sont, d'après la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui identifie la gravitation à une courbure de l'espace-temps, des ondes de déformation de l'espace-temps. On attend toujours leur découverte directe.

Les **ONDES DE KELVIN-HELMHOLTZ** sont des ondulations qui se forment à la surface de contact de deux couches de fluide en mouvement à des vitesses suffisamment différentes.

Le mouvement de la marée le long des mers peut être décrit comme une somme de nombreuses ondes périodiques nommées **ONDES DE MARÉE**.

## LES ONDES EN PHYSIQUE QUANTIQUE

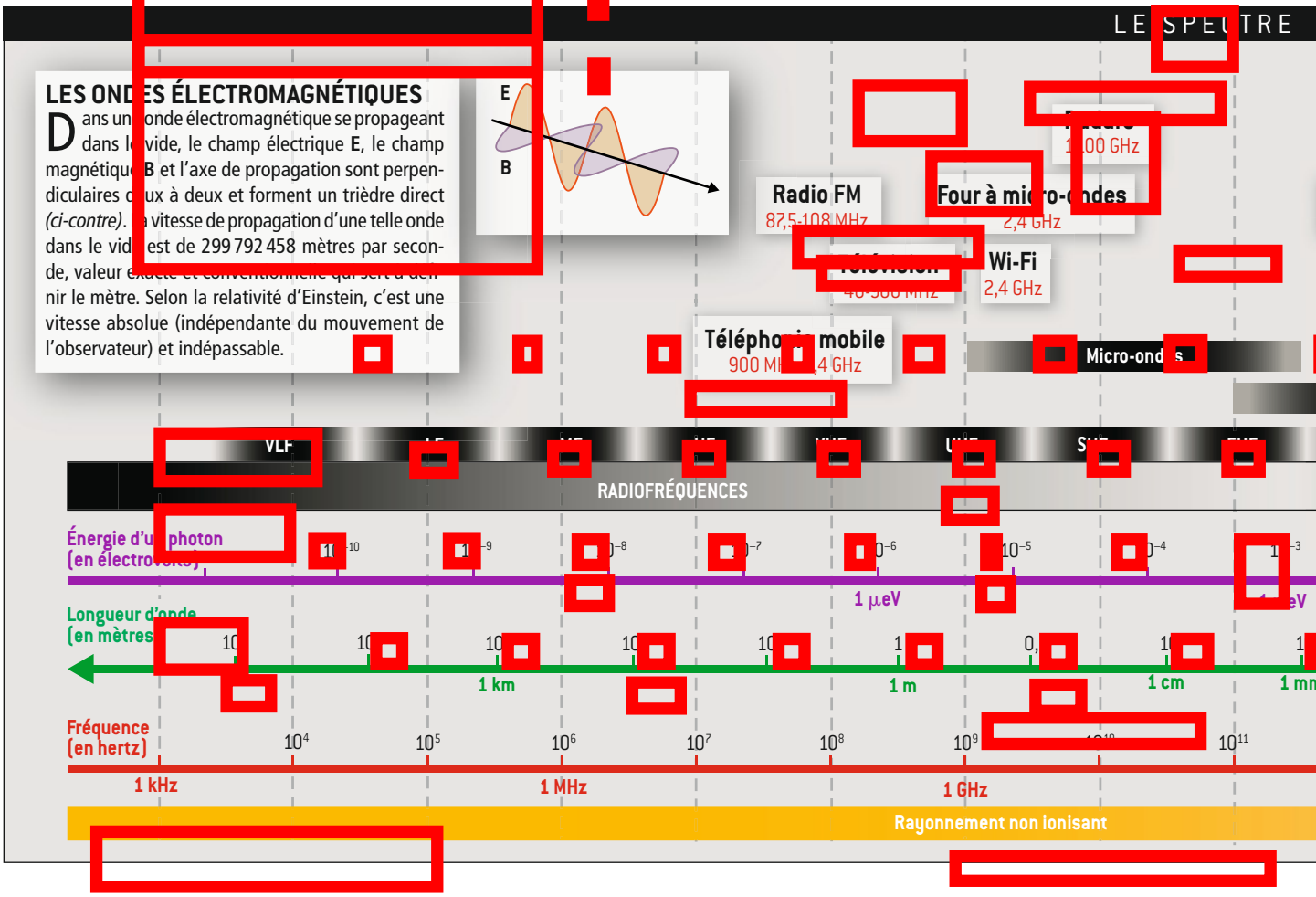
La mécanique quantique attribue à toute particule libre une longueur d'onde égale à $h/p$, où $h$ est la constante de Planck et $p$ la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) de la particule. Cette **LONGUEUR D'ONDE DE DE BROGLIE** confère à la matière des propriétés ondulatoires, d'où la notion d'**ONDES DE MATIÈRE**.

Plus généralement, en mécanique quantique non relativiste, un système physique est décrit par une **FONCTION D'ONDE**, solution de l'équation dite de Schrödinger ; cette fonction de la position et du temps détermine, en termes probabilistes, le comportement du système (par exemple la densité de probabilité de présence d'un électron dans un atome).

## LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans une onde électromagnétique se propageant dans le vide, le champ électrique **E**, le champ magnétique **B** et l'axe de propagation sont perpendiculaires deux à deux et forment un trièdre direct *(ci-contre)*. La vitesse de propagation d'une telle onde dans le vide est de 299 792 458 mètres par seconde, valeur exacte et conventionnelle qui sert à définir le mètre. Selon la relativité d'Einstein, c'est une vitesse absolue (indépendante du mouvement de l'observateur) et indépassable.





© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

En théorie quantique des champs, qui intègre la théorie de la relativité restreinte, les entités fondamentales sont les **CHAMPS QUANTIQUES**, objets mathématiques définis partout et à tout instant, et obéissant à des équations analogues à celles des ondes classiques. Un champ quantique transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement par quantités bien définies appelées **QUANTA**. Ainsi, les quanta du champ électromagnétique sont les **PHOTONS**. Les électrons et les positrons sont les quanta d'un autre type de champ, etc.

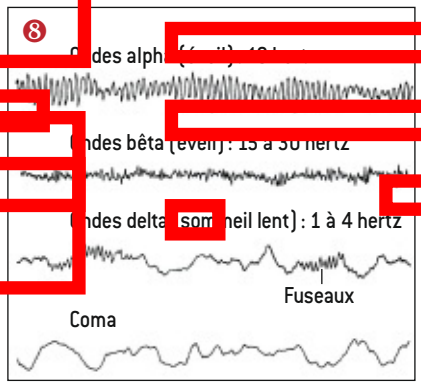
De façon analogue, les **PHONONS** sont les quanta des **ONDES DE VIBRATION** qui se propagent dans un réseau cristallin, et les **MAGNONS** sont les quanta des **ONDES DE SPIN** (ondes où la grandeur physique est l'orientation du spin ou moment magnétique des atomes).

## LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans les **ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES**, dont font partie les **ONDES LUMINEUSES**, c'est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propage *(voir ci-dessus)*.

## LES ONDES DU CERVEAU

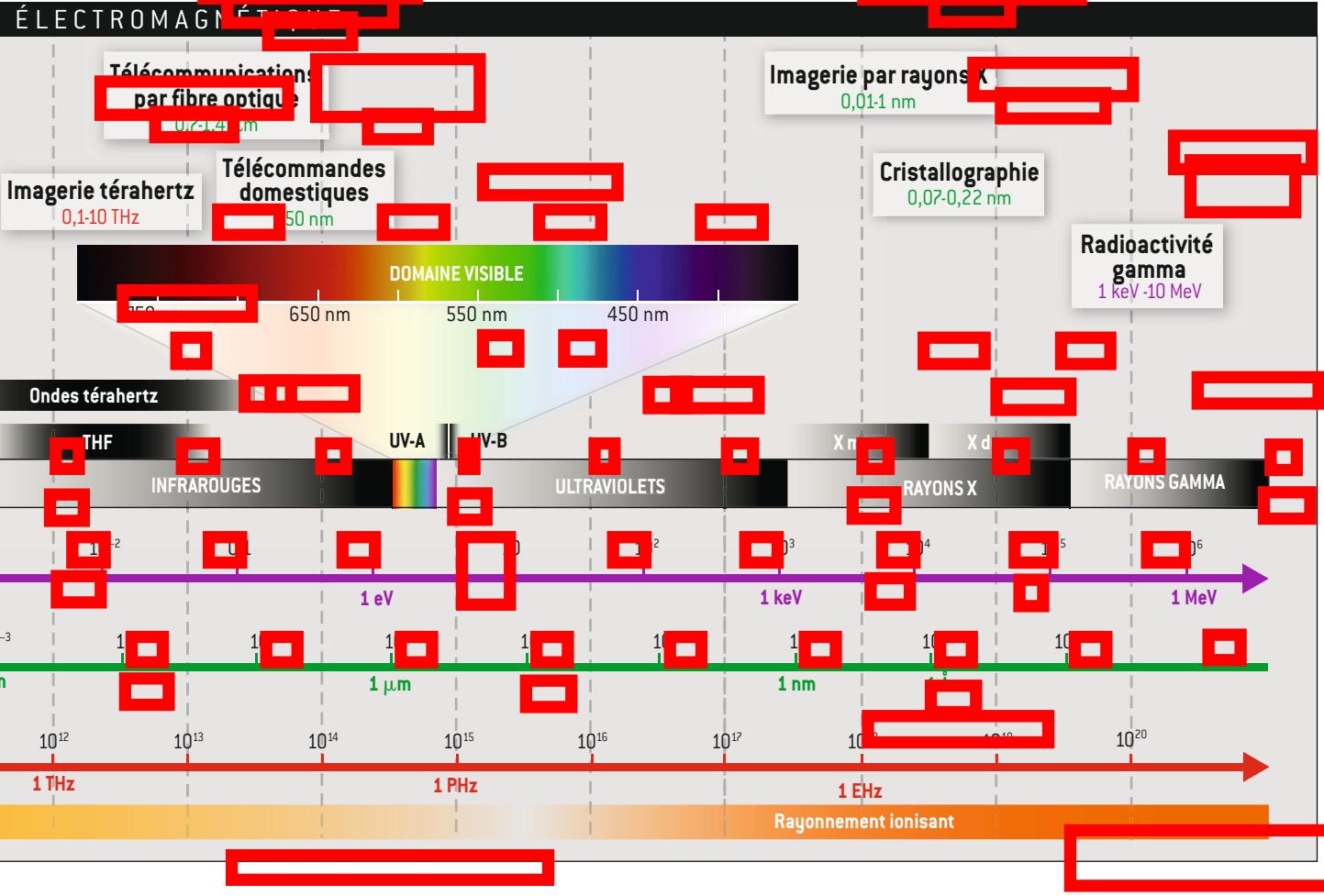
On peut enregistrer à la surface du cerveau des différences de potentiel variant de quelques microvolts à plusieurs millivolts. Ces variations résultent de la présence d'ondes électriques qui naissent et se propagent dans le cerveau. En effet, de minuscules courants électriques se créent dans les neurones, dus à la circulation d'ions entre l'intérieur et l'extérieur de ces cellules, au niveau des synapses (les connexions entre neurones). Les courants individuels sont infimes ;




mais, parce que les prolongements des neurones où ils se déplacent sont parallèles, la somme d'innombrables courants infimes donne un courant macroscopique, à l'origine des ondes électriques cérébrales.

Le tracé d'un électroencéphalogramme, EEG, est extrêmement compliqué, mais il est possible de le décomposer en types d'ondes particuliers que l'on sait associer aux différentes phases de vigilance de l'individu : éveil (au repos, en activité, méditation, etc.), sommeil (sommeil lent profond ou paradoxal) ou encore absence de conscience, par exemple coma. Chacun de ces types d'ondes présente une bande de fréquence caractéristique 8.

Les données enregistrées sur un EEG varient selon l'emplacement des électrodes sur le cuir chevelu. C'est l'analyse de toutes les composantes d'un EEG qui donnent accès en temps réel aux processus cognitifs en cours, normaux ou pathologiques. Les EEG ont une précision temporelle (une milliseconde) supérieure à celle qu'offrent les autres méthodes d'investigation de l'activité cérébrale. ■



HISTOIRE DES SCIENCES

# La victoire posthume de Robert Scott

*Il y a 100 ans, l'explorateur britannique Robert Scott perdait la course à la conquête du pôle Sud, choisissant de privilégier les objectifs scientifiques de son expédition. Ses découvertes jouèrent un rôle majeur dans l'acceptation de la théorie de l'évolution.*

**Edward LARSON**

Juin 1911. Robert Scott et 32 explorateurs – scientifiques, officiers et marins britanniques, pour la plupart – patientent, reclus dans leur campement, en plein hiver austral. Dans l'Antarctique, à cette époque de l'année, le soleil ne dépasse jamais l'horizon et une couche de 2,50 mètres de glace fige la mer alentour. Le blizzard souffle presque sans discontinuer. Les températures hivernales sur l'île de Ross, la terre émergée la plus méridionale qu'ait pu atteindre le bateau de Scott, peuvent descendre en dessous de – 45 °C. Coupé du monde extérieur, l'équipage attend les journées printanières du mois d'octobre. Alors, certains parcourront les quelque 1 500 kilomètres de banquise qui couvrent la baie de Ross *(voir la figure 4)*. Leur objectif : le pôle Sud.

Deux expéditions britanniques ont déjà tenté l'aventure, l'une menée par Scott (1901-1904) et l'autre par Ernest Shackleton (1907-1909). Sans succès. Cette fois, Scott est parti confiant. Ayant tiré les leçons des expéditions précédentes, il a organisé celle-ci de façon méthodique, afin non seulement d'être le premier à atteindre le pôle, mais aussi de remplir d'ambitieux objectifs scientifiques. Il a mis en place plusieurs équipes qui se déploieront dans la baie de la mer de Ross, collecteront des fossiles et diverses données scientifiques. Et au printemps, sa propre équipe se mettra en route vers le Sud pour atteindre le pôle au début de l'été austral et y planter le drapeau anglais.

Mais un événement a perturbé ces plans. En février 1911, un navire, l'Édouard VII, à l'Est de la baie de Ross, sur le point de repartir vers la Nouvelle-Zélande, a découvert des hommes de Scott se sont retrouvés nez à nez avec un autre équipage, à environ 560 kilomètres du campement britannique : neuf hommes originaires de Norvège, avec à leur tête Roald Amundsen, expert dans la manœuvre des chiens d'attelage et skieur hors pair. En 1905, il a été le premier à franchir le passage du Nord-Ouest dans l'Arctique canadien. Amundsen aurait dû être en route pour le pôle Nord. Mais, dans le plus grand secret, il a modifié ses plans et mis le cap sur le Sud. Une tentative de prendre les explorateurs britanniques de vitesse, interprétera Scott. Les hommes d'Amundsen voyagent légers, sans objectifs scientifiques. Avec leurs seuls skis et chiens de traîneau, ils ont prévu de parcourir vers le pôle à partir d'une base plus proche de 100 kilomètres que celle de Scott.

Scott Polar Research Institute, University of Cambridge

**1. GEORGE SIMPSON,** météorologue de l'expédition, effectue des observations au cap Evans.

La nouvelle a créé le trouble dans le campement de Scott. Certains membres de l'équipe ont suggéré d'abandonner la partie scientifique pour se concentrer sur le pôle. Mais Scott n'était pas de cet avis. Sa première expédition avait permis d'amasser une grande quantité d'échantillons géologiques et biologiques, de relevés météorologiques et magnétiques et de découvertes océanographiques et glaciologiques. Une part importante de la nouvelle expédition doit rester dévolue à la science : « Poursuivre l'exécution de notre programme, comme si aucun fait nouveau ne s'était produit, c'est le seul parti à prendre », note-t-il dans son journal. D'un point de vue scientifique, on ne peut que lui être reconnaissant d'avoir maintenu ses plans : ses découvertes constitueront une preuve importante en faveur de la théorie de l'évolution de Darwin. Mais lui et ses hommes paieront cher cette décision.

## À la recherche d'une plante fossile

Au début du XX^e^ siècle, la théorie de l'évolution, publiée par le naturaliste britannique en 1859, est un sujet brûlant. Les scientifiques sont à l'affût d'un fossile qui appuierait les thèses de Darwin : une plante de l'ère paléozoïque appelée *Glossopteris*. Des fossiles de cette plante à feuilles larges ont été retrouvés en Afrique, en Australie et en Amérique du Sud. Les créationnistes, qui défendent une lecture littérale du récit biblique de la création et s'opposent à la vision darwinienne de l'évolution des espèces, sou-



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

**2. L'UN DES 32 MEMBRES** de l'expédition Scott passe en luge devant Castle Berg, une énorme masse de glace au large de l'île de Ross, en Antarctique.

Corbis

tiennent que ce genre de plante est apparu de façon soudaine et isolée sur ces continents. De son côté, Darwin a proposé que la plante ait pu se développée sur un bloc continental polaire qui aurait été relié aux autres continents de l'hémisphère Sud. Lors de sa première expédition, Scott avait découvert des affleurements de charbon qui prouvaient que des plantes avaient un jour poussé dans l'Antarctique. Et Shackleton avait trouvé des plantes fossilisées, mais pas de *Glossopteris*. Scott a bien l'intention, cette fois, de résoudre l'énigme.

Il a donc imaginé une expédition en plusieurs étapes, et avec divers groupes de soutien qui, une fois leur tâche accomplie, rebrousseront chemin, laissant un tout petit équipage rejoindre le pôle à pied, avec une seule luge. Cette tactique, pense Scott, offrira une marge de sécurité et permettra peut-être aux équipes de collecter des données scientifiques tout au long du chemin. De même, plusieurs officiers et scientifiques resteront au camp de base pour enregistrer les données météorologiques et magnétiques, tandis que les marins et d'autres scientifiques demeureront à bord du bateau de Scott pour mener des recherches océanographiques.

Le programme scientifique de Scott est chargé. Dès l'établissement du camp de base, en janvier 1911, Scott a envoyé dix hommes en deux groupes pour explorer montagnes et glaciers. Le plus important des deux groupes est retourné peu après sur le terrain pour une autre mission scientifique : explorer les affleurements, les glaciers et les anses sur la côte septentrionale de la terre Victoria. Comme prévu, cette équipe passe là-bas l'hiver austral 1911. Elle ne rentrera au camp de base qu'en novembre 1912 – avec quantité de fossiles, dont une empreinte d'arbre étonnante, mais sans *Glossopteris*.

En parallèle, de février à mars 1911, le second groupe, dont font partie les géologues Griffith Taylor et Franck Debenham, a exploré les vallées sèches, les pics émergeant de la glace et les gigantesques glaciers au milieu de la côte de la terre Victoria. D'avril à octobre 1911, le groupe passe les longs mois d'hiver au camp de base, examinant ses trouvailles, dont de nombreux

L'AUTEUR

Edward LARSON est professeur d'histoire et de droit à l'Université Pepperdine (Malibu, Californie, États-Unis).

fossiles, mais toujours pas de *Glossopteris*. Début novembre 1911, Taylor et Debenham repartent pour une mission encore plus longue, juste après le départ de Scott pour le pôle. Ils emmènent Tryggve Gran, le meilleur skieur nordique de Scott, et Robert Forde, le plus costaud des conducteurs de traîneaux, pour affronter les terrains difficiles. En choisissant d'affecter Gran et Forde au groupe des scientifiques plutôt qu'à son propre équipage, Scott montre bien son parti pris scientifique. Cette stratégie se révélera payante : Taylor et Debenham exploreront une vaste région de montagnes et de glaciers jusque-là inconnus, où ils découvriront un remarquable ensemble de fossiles de l'ère paléozoïque (mais hélas, pas de *Glossopteris*).

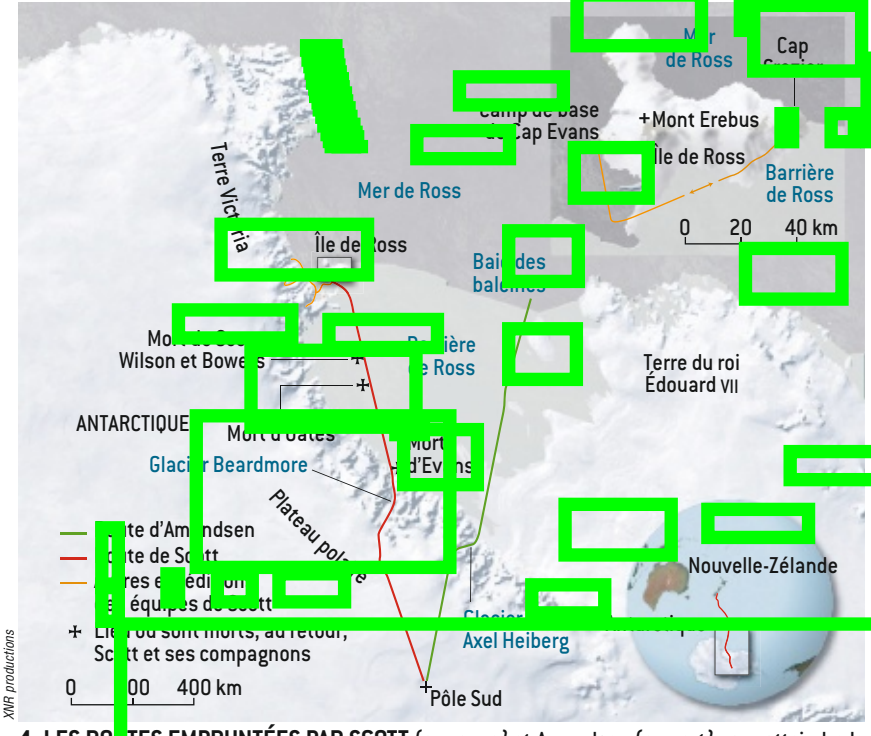
La mission qui éloigna le plus Scott de la conquête du pôle était liée à une promesse qu'il avait faite au médecin et naturaliste Edward Wilson. Lors de la première expédition de Scott dans l'Antarctique, Wilson s'était distingué en tant que zoologiste. Il avait trouvé une colonie de manchots empereurs au cap Crozier, à l'Est de l'île de Ross, et découvert que ces oiseaux marins pondaient et couvaient leurs œufs pendant l'hiver. Scott avait promis à Wilson que s'il l'accompagnait à nouveau, il pourrait rejoindre cette colonie en période hivernale pour prélever des œufs et observer si les embryons de manchots empereurs montraient des vestiges de dentition reptilienne. Wilson espérait trouver le chaînon manquant entre les oiseaux et les reptiles.

Avec cette mission, Scott s'est privé de trois aides précieuses pour planifier et préparer l'expédition au pôle : Wilson, son assistant zoologiste Apsley Cherry-Garrard et le lieutenant Henry Bowers. Soumis aux aléas d'une marche de 110 kilomètres sur la barrière de Ross, en pleine nuit polaire, Wilson et ses coéquipiers sont partis le 27 juin 1911 avec 340 kilogrammes de matériel scientifique, de vêtements chauds et de vivres chargés sur deux luges attachées l'une à l'autre et tirées par les hommes munis de harnais.

L'équipe revient quelques semaines plus tard dans un piteux état : une forte tempête a détruit leur tente et enseveli les six œufs difficilement récoltés ; les conditions météorologiques ont rendu le retour éprouvant. En septembre 1911, enfin, Scott entreprend avec Bowers et Edgar Evans, officier de la marine britannique, une dernière mission de deux semaines avant l'expédition vers le pôle : 280 kilomètres pour vérifier les piquets qu'une autre équipe a plantés dans les glaciers afin de mesurer leurs mouvements.

Scott Polar Research Institute, University of Cambridge

**3. LE GÉOLOGUE** Franck Debenham polit des échantillons de roche.




XNR productions

**4. LES ROUTES EMPRUNTÉES PAR SCOTT** *(en rouge)* et Amundsen *(en vert)* pour atteindre le pôle Sud. Avant que Scott ne quitte le cap Evans où se trouvait son camp de base, ses hommes ont passé des mois à effectuer des recherches scientifiques sur l'île de Ross et au-delà, au cap Crozier ou sur la terre Victoria. Lors du retour, qui s'est fatal, Scott et ses compagnons – Evans, Oates, Bowers et Wilson – ont collecté 15 kilogrammes de fossiles et de roches.

## La conquête du pôle

Le mauvais temps et divers soucis d'organisation différent le départ vers le pôle au 1er novembre 1911. Amundsen devance déjà les Britanniques de 12 jours. Peu avant de quitter le camp de base, Scott note dans son journal qu'il ne sait pas trop quoi penser des chances d'Amundsen d'atteindre le pôle. Il raconte comment, très tôt, il a décidé de faire connaître si ce dernier n'avait pas existé, car entrer dans la course aurait fait échouer son plan. Plusieurs équipes de soutien coopèrent : l'une hale de [illegible] la première pla



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

teforme glaciaire à l'aide de deux traîneaux automobiles. D'autres, avec des chiens et des poneys, iront jusqu'au pied du glacier Beardmore, voire jusqu'au sommet. Chaque équipe constitue des dépôts de vivres pour le retour de l'expédition, puis se sépare du groupe pour retourner à la base, jusqu'à ce qu'une seule équipe demeure, pour tirer la luge et traverser le plateau polaire à une altitude de 3 000 mètres en direction du pôle. La progression est lente, car les poneys avancent difficilement dans la poudreuse.

Le 3 janvier 1912, la dernière équipe de soutien quitte le plateau. Scott et ses hommes – Wilson, Bowers, Evans et le capitaine de l'armée britannique Lawrence Oates – sont désormais seuls face aux 240 kilomètres de glace qui les séparent du pôle. Les objectifs scientifiques sont réduits à quelques relevés météorologiques ou à des observations de la surface, balayée par le vent.

Pendant ce temps, Amundsen et ses hommes, soutenus par des chiens d'attelage efficaces, progressent vite. Ils atteignent le pôle le 14 décembre 1911, deux mois après leur départ. Leur retour est encore plus rapide : la surface est ferme, la pente favorable et les dépôts de vivres bien espacés. Cinq semaines leur suffisent pour rejoindre leur base.

Le 17 janvier 1912, Scott atteint le pôle et trouve le drapeau norvégien. « Grand Dieu, écrit-il, quel horrible pays ! »

## Triste retour

Le pire reste à venir. Le froid devient intense et la neige prend l'aspect d'une couche sableuse. Les hommes s'enfoncent. Pas moyen de faire glisser la luge, il faut la tirer. Il reste des vivres, mais en quantité insuffisante pour un tel effort. Les hommes s'épuisent. Les mains d'Evans sont entaillées et ses blessures s'infectent. Oates souffre d'engelures. Tous présentent des symptômes du scorbut. Ils prennent néanmoins le temps d'effectuer quelques observations géologiques. En descendant le glacier Beardmore, ils se dirigent vers la moraine située au-dessous du mont Buckley. « La moraine est très intéressante ; aussi [...] je décide de camper et de passer le reste de la journée à faire de la géologie » [illegible]

Scott Polar Research Institute, University of Cambridge

**5. SCOTT, WILSON, EVANS ET OATES** photographiés au pôle par Bowers après la découverte du drapeau planté par Amundsen.

sus de tous s'élèvent les falaises perpendiculaires constituées par des grès Beacon très attaqués par l'érosion subaérienne et recoupées de veines de charbon. Dans ce charbon, Wilson récolte des empreintes de plantes, notamment un fragment composé de lits de feuilles très nettes. « Ces plantes ressemblent fort à des *Glossopteris*. Avec l'aide de Bower, Wilson extrait 15 kilogrammes de fossiles et d'échantillons de roche.

Evans et Oates meurent les premiers. Après une semaine pénible consacrée à la descente du glacier, Evans est de plus en plus désorienté. Il perd connaissance et meurt le 17 février. Les engelures d'Oates s'aggravent au point qu'il ne peut plus suivre. Refusant de retarder les autres, il quitte la tente le 16 mars, en pleine tempête, pour ne plus revenir. Les derniers membres de l'expédition marchent encore le 19 mars. Ils ne portent que le strict nécessaire. À la demande de Wilson, ils ont pris avec eux leurs notes de terrain et les spécimens géologiques. À moins de 20 kilomètres d'un dépôt de vivres, coincés pendant huit jours par un blizzard sans nourriture ni combustible, ils meurent les uns contre les autres.

Une équipe de secours retrouvera leurs corps gelés au printemps, ainsi que leurs écrits et les fameux spécimens. Wilson avait vu juste : il s'agissait bien des *Glossopteris* tant recherchés. Scott aurait été comblé. Darwin avait raison, et il avait contribué à le prouver.

## BIBLIOGRAPHIE


E. J. Larson, **An Empire of Ice. Scott, Shackleton and the Heroic Age of Antarctic Science**, Yale University Press, 2011.

A. Cherry-Garrard, **Le pire voyage au monde. Antarctique 1910-1913**, Paulsen, 2008.

D. Crane, **Scott of the Antarctic**, Vintage, 2007.

S. Solomon, **The Coldest March**, Yale University Press, 2001.

R. Huntford, **The Last Place on Earth : Scott and Amundsen's Race to the South Pole**, Modern Library, 1999.

**Le Pôle mertrier, 1910-1912. Robert Falcon Scott**, Pygmalion, 1992.

**Le Pôle mertrier, 1910-1912. Journal du capitaine Scott**, Hachette, 1914.

R. Amundsen, **Au Pôle Sud. Expédition du Fram. 1910-1912**, Hachette, 1913.

LOGIQUE & CALCUL

# Les surprises du jeu de pile ou face

*Les erreurs de nos jugements spontanés sont parfois étonnantes. Le hasard créé par les lancers d'une pièce de monnaie en est l'exemple le plus frappant : tout y semble paradoxal.*

Jean-Paul DELAHAYE

© Shutterstock/James Steidl

Les suites de piles ou faces obtenues avec une pièce non truquée nous semblent sans grand mystère et nous ne doutons guère de nos prédictions statistiques. Ce faisant, nous ignorons une multitude de subtilités, ignorance qui nous conduit à l'erreur, voire nous ferait perdre de l'argent en cas de paris. Comprendre pourquoi et tirer toutes les leçons des pièges tendus à la raison par ces suites de tirages équitables et indépendants est un travail délicat et difficile comme l'attestent les dizaines d'articles publiés depuis 40 ans sur ce sujet.

Un premier exemple de piège, dont l'idée a été proposée en 1969 par l'amateur de récréations mathématiques Walter Penney, consiste à lancer une pièce de monnaie (non truquée) autant de fois qu'il le faut jusqu'à obtenir des séquences de piles ou faces fixées à l'avance. On cherche par exemple à obtenir la séquence pile-face, notée PF, ou face-face, notée FF. La question posée est : laquelle a le plus de chances de se présenter en premier, et combien est-il raisonnable de parier sur elle ?

**Raisonnement A.** Considérons deux tirages successifs d'une pièce de monnaie ; il y a autant de chances d'obtenir PF que FF, et cette probabilité est $(1/2)^2 = 1/4$. Les deux séquences PF et FF étant équiprobables, chacune a la même probabilité de sortir en premier, et la probabilité que PF survienne avant FF est donc 1/2. Les deux séquences sont donc équiprobables tant sur des bases égales, si l'on nous propose de parier, nous pouvons choisir indifféremment l'une ou l'autre et miser 1 euro contre 1 euro.

Or la réalité est bien différente : dans une compétition entre PF et FF, la séquence PF gagnera trois fois sur quatre. Il est donc intéressant d'accepter de miser 2 euros pour PF contre 1 euro en faveur de FF ; un pari ne favorisant aucun joueur consiste à miser 3 euros pour PF contre 1 pour FF. Voici la démonstration de ces affirmations.

**Raisonnement B.** Les deux premiers tirages peuvent être PF, FP, PP ou FF. Ces quatre débuts possibles sont équiprobables, chacun survenant avec une probabilité 1/4. Si c'est FF qui sort, la séquence FF aura gagné la compétition. Dans les trois autres cas, la gagnante sera toujours PF. En effet, dès qu'un P tombe, FF ne peut plus sortir avant PF : tant que des P continuent de tomber aucune ne gagne, et dès que F tombe, PF gagne. Si l'on vous propose ce jeu, choisissez PF : vous gagnerez trois fois sur quatre.

Où est l'erreur dans le raisonnement A ? Sa première phrase est indubitable. Elle implique d'ailleurs que dans une longue séquence de P ou F tirée avec une pièce de monnaie non truquée, il y aura en moyenne autant de couples PF que de couples FF. L'erreur est dans la seconde phrase : « Les deux séquences PF et FF étant équiprobables, chacune a la même probabilité d'être obtenue en premier, et donc, la probabilité que PF survienne avant FF est 1/2. » En effet, même si les deux séquences sont équiprobables, les relations qu'elles entretiennent, comme le détaille le raisonnement B, ont pour conséquence que dès qu'un P est tombé FF ne peut plus gagner, ce qui entraîne alors que la séquence PF apparaîtra en premier trois fois plus souvent que FF.



Le même type de blocage d'une séquence par une autre montre que si l'on oppose PF à FFF, la première séquence gagne sept fois sur huit. Plus généralement, si l'on oppose PF...F ($(n-1)$ fois F) à FF... ($n$ fois F), alors la première séquence gagne $(2^n - 1)$ fois sur $2^n$ ; nous ne devrons donc pas hésiter à parier 1 000 euros contre 1 euro en choisissant PFFFFFFFFF contre FFFFFFFFFF.

Si votre doute persiste, opérez un contrôle expérimental avec une pièce de monnaie, en programmant une simulation avec votre ordinateur ou encore en associant aux décimales impaires de $\pi$ et F aux décimales paires *(voir la série illustrée ci-dessus et ci-contre)*. Dans ce dernier cas, vous pouvez commencer la série





© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

avec 3, avec 1, avec 4, etc. J'avoue avoir fait un tel test pour m'assurer que, lors d'une longue série de tirages, le nombre moyen de FF est le même que le nombre moyen de PF, ce que je n'arrivais pas à considérer comme compatible avec la probabilité de gain de 3/4 en faveur de PF. Le test a bien évidemment donné le résultat décrit par la théorie, pour la fréquence égale de PF et de FF, et celui du raisonnement B, pour le 3/4 en faveur de PF dans une compétition.

Le petit calcul énumératif suivant ne constitue pas une preuve (elle est dans le raisonnement B !), mais il vous aidera sans ordinateur à accepter l'étrange compatibilité entre les diverses affirmations que nous avons formulées. Considérons les 16 séquences possibles et équiprobables qu'on obtient en opérant quatre tirages :
PPPP-PPPF-PPFP-PPFF-PFPP-PFPF-PFFP-PFFF
FPPP-FPPF-FPFP-FPFF-FFPP-FFPF-FFFP-FFFF.

La séquence FF est présente 12 fois comme la séquence PF ; il y a donc bien égalité des fréquences, et FF (ainsi que PF) apparaît dans un quart des 48 couples obtenus avec les 16 tirages de longueur 4. Entre FF et PF, quelle séquence arrive en premier ? On constate que PF gagne 10 fois *(en vert)* alors que FF ne gagne que 4 fois *(en rouge)*. Dans deux cas (PPPP et FPPP), aucune séquence n'a gagné et les tirages doivent donc se poursuivre ; PF gagnera alors nécessairement puisque les deux séquences indéterminées se terminent par un P ce qui interdit mécaniquement à FF d'apparaître avant PF. Au total, on trouve donc que PF gagne exactement trois fois sur quatre.

Si l'on envisage les autres compétitions entre séquences de longueur 2, les résultats, facile à établir (car résultant de symétrie ou se ramenant à la compétition FF contre PF), sont les suivants :
PP gagne contre PF avec une probabilité 1/2,
PP gagne contre FP avec une probabilité 1/4,
PP gagne contre FF avec une probabilité 1/2,
PF gagne contre FP avec une probabilité 1/2,
PF gagne contre FF avec une probabilité 3/4,
FP gagne contre FF avec une probabilité 1/2.

## Le temps moyen d'attente

Malheureusement, les cas particuliers que nous venons d'envisager ne nous permettent pas de savoir ce qui se passe quand on oppose deux séquences quelconques, par exemple PFP et FPF. La notion de temps moyen d'attente devrait nous aider. Une séquence S étant fixée, on nomme temps moyen d'attente de S le nombre moyen de fois qu'il faut lancer la pièce pour que S se présente. Par exemple, le temps moyen d'attente de P (ou de F) est 2 *(voir l'encadré 1)*.

Deux séquences S et S' de longueur $k$ ont la même probabilité de se produire quand on lance $k$ fois la pièce ; elles apparaissent donc avec la même fréquence quand on lance indéfiniment la pièce. On est tenté d'en déduire que les temps moyens d'attente de S et de S' sont égaux. Pourtant, comme dans le cas des compétitions entre deux séquences, ce serait une erreur : le temps moyen d'attente de FF est 6, alors que le temps moyen d'attente de PF est 4.

Cette surprise va cependant dans le même sens que la précédente, quand nous opposions FF à PF. Puisque FF apparaît en moyenne plus tardivement dans une suite de lancers que PF, il semble assez naturel que FF se fasse battre par PF quand on cherche à savoir laquelle arrive le plus souvent en premier. Peut-on déduire le 3/4 de tout à l'heure en faveur de PF, des temps d'attente moyens 6 et 4 ? Cela ne semble pas bien clair et si nous voulions chercher une règle nous ne la trouverions jamais : ici encore, un phénomène inattendu contrarie notre intuition et rend illusoire la déduction du 3/4 à partir des temps d'attente moyens. En effet, il se peut très bien que le temps d'attente moyen d'une séquence $S_1$ soit plus long que le temps d'attente d'une séquence $S_2$ et que, pourtant, dans une compétition entre $S_1$ et $S_2$, la séquence $S_1$ se présente plus souvent avant $S_2$ que l'inverse.

L'exemple le plus simple d'une telle situation paradoxale est donné par les deux séquences $S_1$ = PFPF et $S_2$ = FPFF. La séquence $S_1$ a un temps d'attente de 20, alors que $S_2$ a un temps d'attente de 18. Pourtant, $S_1$ arrive devant $S_2$ avec une probabilité égale à 9/14, soit 0,6428.

Les trois notions « fréquence d'apparition », « temps moyen d'attente » et « gagnant d'une compétition entre deux séquences », que nous lions intuitivement quand nous comparons deux séquences, sont en réalité indépendantes !

## Intransitivité

Résumons la situation multiparadoxale à laquelle nous sommes parvenus :
*(a)* Deux séquences de longueur égale ont la même probabilité de survenir en un emplacement donné d'une suite infinie de tirages ; leurs fréquences moyennes d'apparition sont donc les mêmes.

Pourtant :
*(b)* Il se peut que l'une d'elles survienne plus souvent avant l'autre dans une compétition entre elles.
*(c)* Il se peut qu'elles aient des temps d'attente différents.

De plus, et cela paraît un comble :
*(d)* Il est possible que celle qui arrive statistiquement le plus tardivement soit, en moyenne, plus souvent devant l'autre quand on les fait concourir l'une contre l'autre.

Les comportements contre-intuitifs des suites de tirages à pile ou face vont encore plus loin :
*(e)* Une séquence plus courte peut perdre dans une compétition qui l'oppose à une séquence plus longue ; tel est le cas quand

## 1. Surprise pour le temps moyen d'attente

Quand on lance deux fois une pièce de monnaie, la probabilité d'obtenir FF est la même que la probabilité d'obtenir PF et vaut 1/4. En lançant indéfiniment la pièce, la fréquence d'apparition de FF sera 1/4, de même que pour PF. On est tenté d'en déduire que, quand on lance une pièce de monnaie indéfiniment, on attend en moyenne autant de temps pour obtenir FF que PF. C'est faux : le temps moyen d'attente de FF est de six lancers alors que le temps moyen d'attente de PF est de quatre lancers. Cela choque l'intuition et paraît même impossible !

Jean-Michel Thinet

Pour comprendre l'affirmation, on peut mener une vérification expérimentale ou raisonner.

**Exemple 1**. Le temps d'attente moyen de la séquence P (une fois pile) est 2. En effet :
– Une fois sur deux, on obtient P dès le premier tirage (temps d'attente égal à 1). Dans la moyenne, on a donc 1 avec un poids 1/2.
– Une fois sur quatre, on a le début FP, et le temps d'attente a donc été 2. Dans la moyenne, on a 2 avec un poids 1/4.
– Une fois sur huit, on a le début FFP. Dans la moyenne, on a donc 3 avec un poids 1/8 ; etc.

Le temps d'attente moyen de P est la somme de la série :
$1/2 + 2 \times 1/4 + 3 \times 1/8 + 4 \times 1/16 + \ldots$ Cette série se calcule à partir de la série géométrique classique $1/2 + 1/4 + 1/8 + \ldots = 1$.
$1/2 + 2 \times 1/4 + 3 \times 1/8 + 4 \times 1/16 + \ldots =$
$1/2 +$
$+ \quad 1/4 + \quad 1/8 + \quad 1/16 + \ldots$
$\quad + \quad 1/8 + \quad 1/16 + \ldots$
$\quad\quad + \quad 1/16 + \ldots$

La première ligne (c'est la première divisée par 2), la troisième 1/4 (c'est la première divisée par 4), etc. Le tout vaut ainsi $1/2 + 1/4 + 1/8 + \ldots = 2$.

**Exemple 2.** Calculons maintenant le temps moyen d'attente T de la séquence FF. En envisageant les deux possibilités pour le premier tirage, on a :

$T = 1/2 \times$ (temps moyen d'attente de FF si le premier tirage a donné F) $+ 1/2 \times$ (temps moyen d'attente de FF si le premier tirage a donné P).

Le temps moyen d'attente de FF quand le premier tirage a donné P est bien sûr une unité de plus que le temps moyen d'attente de FF, car quand on a obtenu P, ce coup : le P obtenu ne sert à rien et ne servira pas. Le second terme de la somme est donc $1/2 \times (1 + T)$.

Pour le premier terme, on écrit que le temps moyen d'attente de FF si le premier tirage a donné F est égal à (temps moyen d'attente de FF si le premier tirage a donné F et le second a donné F) $+ 1/2 \times$ (temps moyen d'attente de FF si le premier tirage a donné F et le second P).

La première grande parenthèse vaut évidemment 2. Quant à la seconde, en raisonnant comme précédemment et en regroupant ce que nous venons d'obtenir, on a : $T = 1/2 \times [1/2 \times 2 + 1/2 \times (2 + T)] + 1/2 \times (1 + T)$, ce qui, après résolution, donne $T = 6$.

**Exemple 3.** Par la même méthode, en utilisant le résultat de l'exemple 1, on obtient que le temps d'attente moyen T' de PF vérifie :

$T' = 1/2 \times$ (temps moyen d'attente de PF si le premier tirage a donné P) $+ 1/2 \times$ (temps moyen d'attente de PF si le premier tirage a donné F) $= 1/2 \times (1 +$ temps moyen d'attente de F$) + 1/2 \times (1 + T') = 1/2 \times (1 + 2) + 1/2 + T'/2$.

On en déduit $T' = 4$.

on oppose PPP et FFPP, car la seconde gagne avec une probabilité 7/12.

*(f)* Des séquences peuvent avoir des chances égales de gagner dans une compétition à quatre (25 % de chance chacune) et pourtant, dans des compétitions deux à deux, être toujours inégales.

Ainsi, les séquences PPF, PFF, FPP et FFP gagnent chacune dans 25 % des cas quand on les fait concourir toutes les quatre ensemble, mais ne font jamais jeu égal quand on les oppose deux à deux.

*(g)* Il se peut que dans des compétitions deux à deux, on obtienne des cycles du type [$S_1$ bat $S_2$, $S_2$ bat $S_3$, ..., $S_{n-1}$ bat $S_n$, mais $S_n$ bat $S_1$]. Un tel cycle est obtenu avec les quatre séquences PPF, PFF, FPP et FFP (voir *l'encadré 1*) :

PPF bat PFF avec une probabilité 2/3,
PFF bat FFP avec une probabilité 3/4,
FFP bat FPP avec une probabilité 2/3,
FPP bat PPF avec une probabilité 3/4.

## Corriger les fausses simplicités

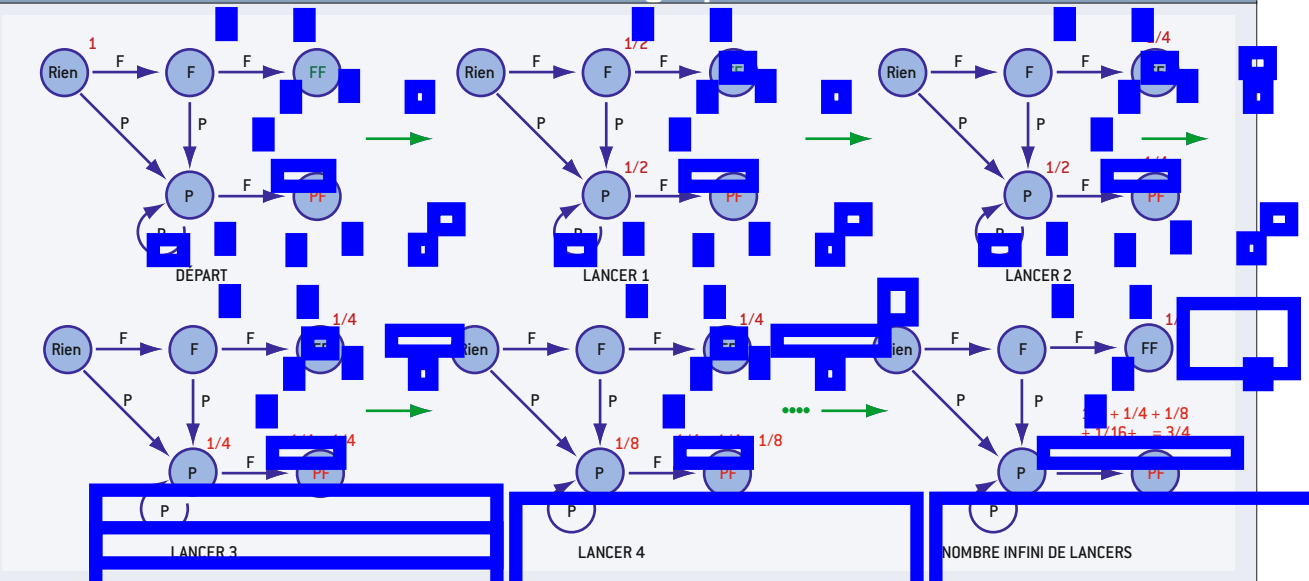
Nous avons donc affaire à un paradoxe de non-transitivité : l'intuition nous souffle que chaque séquence possède une force propre qui lui permet de se présenter en tête devant une autre séquence et que, donc, si $S_1$ est plus forte que $S_2$ et $S_2$ plus forte que $S_3$, alors nécessairement $S_1$ est plus forte que $S_3$. C'est une illusion, car une séquence peut être « forte » devant une deuxième et « faible » devant une troisième. En sport et dans les problèmes d'élection, de telles situations se produisent aussi.

Les encadrés expliquent comment mener les calculs qui vous permettront de vérifier ce qui vient d'être affirmé. L'examen attentif de ces méthodes affine notre compréhension et corrige nos jugements spontanés dont l'inadéquation est flagrante. En relisant le raisonnement B présenté plus haut et en le comprenant, on finit par accepter que PPF gagne contre FF et que, finalement... cela n'aurait pas dû nous étonner. De même, la méthode des graphes d'états *(voir l'encadré 2)* conduit à saisir clairement pourquoi PFF bat par exemple PFF. Plus généralement, elle permet de visualiser le rapport de force entre séquences et de comprendre (et d'éviter) que ce rapport ne



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

## 2. La méthode des graphes d'états




Deux séquences de P et de F étant données, par exemple PF et FF, on lance une pièce de monnaie jusqu'à ce que l'une se présente. Ce sera la gagnante. Contre toute attente, le bon sens suggère, la séquence PF gagnera plus souvent (trois fois sur quatre en moyenne) que la séquence FF.

Pour le prouver, un raisonnement direct est possible *(voir le texte)*, mais la méthode des graphes d'états présentée ici se généralise à tout couple de séquences, à toutes les compétitions entre séquences. C'est elle qui permet de déterminer (sans simulation) les probabilités de gain de ce type de compétitions.

On dessine un graphe dont les nœuds sont tous les débuts possibles de l'une des séquences en compétition. On relie le nœud N au nœud N' si N est le début de N'. Grâce à ce graphe, on calcule les probabilités différentes suivant le lancer après lancer, en opérant un suivi de la probabilité que chaque nouveau tirage fait avancer sur le graphe.

• Au départ, il n'y a aucun P ou F connu : avec une probabilité égale à 1, nous nous trouvons dans l'état « Rien ».

• Après un lancer, le 1 initial s'est séparé en deux fois 1/2, qui se trouvent sur les états P et F. Cela signifie qu'après un lancer, on a une chance sur deux d'être dans l'état P et autant dans l'état F.

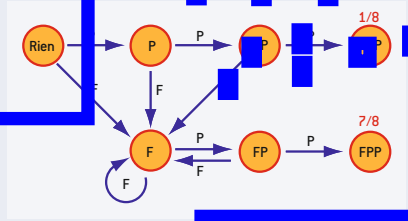
• Après le second lancer, la probabilité 1/2 de l'état F s'est scindée en deux fois 1/4. Le premier 1/4 est allé se placer sur FF qui, maintenant, est marqué par 1/4. L'état P a donné la moitié de sa valeur à l'état PF (marqué maintenant par 1/4) et l'autre moitié de sa valeur à FF qui, en additionnant avec le 1/4 qui vient de l'état F, donne une probabilité 1/2 pour PF. Les marques correspondent aux probabilités que l'on a, après deux lancers, de se trouver dans les états notés sur le graphe.

La circulation des probabilités marquées sur les nœuds du graphe se poursuit selon les mêmes règles : une valeur est coupée en deux et va vers les nœuds voisins en suivant les flèches. Cela donne ainsi, lancer après lancer, les probabilités *(voir rouge)* de se trouver dans un état ou un autre. Bien sûr, quand une probabilité arrive sur l'une des séquences en compétition, elle ne bouge plus. Bien sûr aussi, lors de ces calculs et quelle que soit l'étape, la somme des probabilités sur les nœuds marqués vaut 1.

Il est clair ici que le 1/4 de FF ne changera plus, et que les 3/4 restants vont peu à peu arriver sur PF qui, à l'infini, sera donc marqué par 3/4. L'état du graphe à l'infini indique les probabilités respectives de gain des séquences PF et FF : 1/4 et 3/4.

Appliquée au graphe ci-contre, la méthode permet de savoir très rapidement que PPP ne gagne qu'avec une probabilité de 1/8 contre FPP (seul cas de la probabilité arrive sur PPP, et il faut jouer tant que l'on n'a pas une des deux séquences). Dans le cas de graphes très compliqués, l'étude de la circulation des probabilités d'un nœud à l'autre devient difficile à suivre. Cependant, elle se ramène à un problème classique d'algèbre linéaire qu'on sait parfaitement traiter, et il existe pour connaître les probabilités respectives de gains quel que soit le nombre de séquences en compétition.

Il est intéressant de noter que la circulation des probabilités dans le graphe d'états fonctionne selon un principe identique à celui utilisé par le moteur de recherche *Google* pour attribuer des notes *PageRank* aux pages du Web, notes qui déterminent les rangs d'affichage des pages quand vous soumettez une requête. Au départ, une note égale est attribuée à chaque page ; à chaque étape de répartition, cette note est fractionnée et passe aux pages citées (ce qui permet aux pages souvent citées d'avoir de bonnes notes). Quelques itérations – et non pas une infinité – de ce procédé de redistribution de *PageRank* conduisent à une bonne évaluation de notoriété d'une page. Ce procédé itératif peut se paralléliser facilement et fonctionne donc même avec des milliards de pages à noter.



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

construit à partir de la structure des deux séquences, et qu'il n'y a pas de force propre à une séquence indépendante des compétitions à laquelle on la soumet.

Connaître la fréquence de survenue d'une séquence $S_1$ et son temps moyen d'attente ne suffit pas pour prédire sa force quand elle sera confrontée une autre séquence $S_2$, car cette force se décide face à $S_2$ et est spécifique de la compétition particulière $S_1$ contre $S_2$, contrairement à ce que notre jugement premier nous faisait croire. L'explication de l'inadéquation de nos appréciations spontanées est sans doute à rechercher dans l'expérience que nous avons des nombreuses situations où la force d'un concurrent dans

une compétition provient d'une aptitude qu'il possède en propre (par exemple, en course à pied, son aptitude à aller vite) et qui n'est pas liée aux adversaires qu'il affronte.

Mener le calcul pour savoir qui gagne est un travail délicat par la méthode des graphes d'états. Peut-on arriver au résultat plus rapidement ? Un algorithme miraculeux de John Conway détermine le temps moyen d'attente d'une séquence et la probabilité de gagner d'une séquence par rapport à une autre *(voir l'encadré 4)*.

On ne comprend pas pourquoi l'algorithme de Conway, d'une simplicité déroutante, donne la bonne réponse ... comme bien d'autres résultats de J. Conway. Ce mathématicien n'a jamais publié la preuve que son algorithme calcule convenablement (cela ne signifie pas qu'il n'en connaissait pas). Des démonstrations ont été publiées, dont aucune n'est simple. Nous disposons, grâce au génie de J. Conway, d'un procédé assez rapide pour savoir qui gagne dans une compétition à deux et les temps moyens d'attente. Toutefois, à ma connaissance, il n'existe pas d'algorithme équivalent pour savoir qui gagne dans une compétition entre trois séquences ou plus.

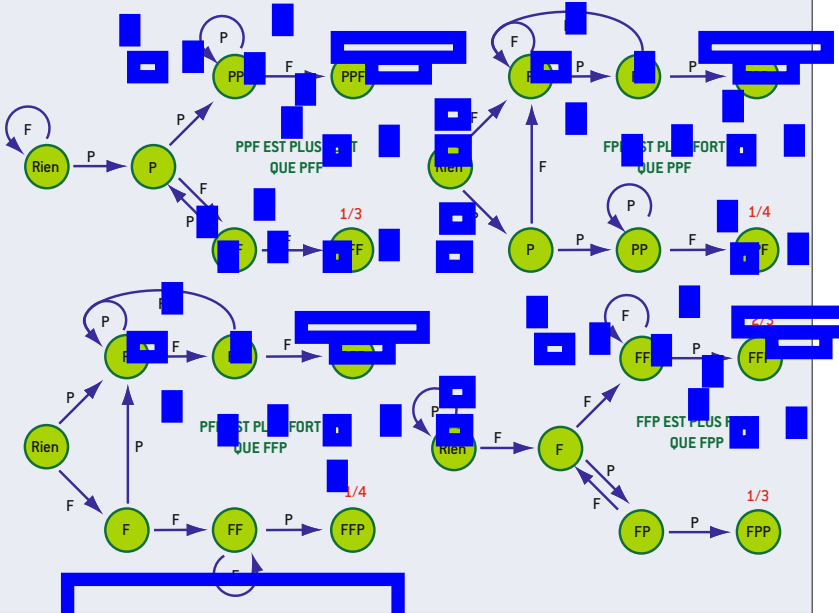
## 3. La non-transitivité de la relation de force

L'examen des quatre graphes d'états correspondant [illegible] FFP–FPP et PPP–PPF indique qu'à chaque confrontation, la pr[illegible] avons donc un cycle paradoxal.

Le 2/3 en faveur de PPF contre PFF se justifie de la manière suivante en utilisant la méthode du graphe d'états. Au départ, on place 1 sur le nœud *Rien*. On suit ce que devient ce 1, lancer après lancer. Malgré la flèche du nœud *Rien* vers lui-même, [illegible] à la limite sur le nœud P. Celui-ci distribue 1/2 à PP qui finit par l'envoyer sur PPF. Le nœud P distribue aussi 1/2 à PF, qui en envoie la moitié à PFF. De-à-dire 1/4 à PFF. Le 1/4 que PF renvoie à P sera pour moitié (1/8) à PP et pour moitié à PF, qui en enverra la moitié à PFF (1/16), etc. Le [illegible] +... = 1/3 (somme des termes d'une suite géométrique). Bien sûr tout le reste, c'est-à-dire 2/3, arrive sur PPF.

Le résultat 3/4 en faveur de PFF quand il est opposé à FFP est plus facile encore à justifier, puisque le nœud FF ne reçoit que 1/4 en tout.

[illegible] graphes d'états [illegible] tiques aux deux premiers à des changements de noms près, et donc se ramènent aux deux premiers. Le cycle est entièrement justifié.




## Choisir à tour de rôle

Avec les suites de P ou F, on peut jouer ou parier. La méthode consistant à proposer la séquence perdante (par exemple FF) alors que vous vous réservez la bonne (PF) risque de susciter la méfiance. Mieux vaut laisser choisir une séquence, puis choisir ensuite une autre séquence de même longueur qui vous fera gagner.

Comment, face à une séquence S donnée, déterminer une séquence qui batte S ? Un examen systématique de toutes les séquences et la comparaison de chaque possibilité avec l'algorithme de Conway donnerait le résultat. De tête, le calcul serait compliqué voire impossible, si le premier joueur a choisi une séquence de plus de dix piles ou faces. Apprendre par cœur le tableau des probabilités de gains (calculé à l'avance) n'est pas plus envisageable, même en se limitant aux séquences de taille inférieure à cinq. Comment [illegible] ?



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

## 4. L'algorithme magique de John Conway

John Conway a conçu un algorithme qui, sans utiliser la méthode des graphes d'états, indique le [illegible] séquence contre une autre [illegible] soient leurs complexités et leurs longueurs.

Considérons par exemple les séquences [illegible]

Plaçons **A** au-dessus de **B** :

**A** PFPP
**B** PPFF

Si les séquences coïncident, écrivons 1 sur les séquences ; sinon, écrivons 0, comme c'est le cas ici :

0
**A** PFPP
**B** PPFF

Comparons [illegible] boles de la première séquence (FP[illegible] les trois premiers de la seconde (PPF). Si ces sous-séquences coïncident, on ajoute [illegible] un 0 :

**A** PFPP

On compare les deux derniers symboles (PP) de la première séquence avec les deux premiers de la seconde (PP), etc. Nous obtenons finalement :

0011 = 3
**A** PFPP
**B** PPFF,

la suite de 0 et de 1 étant lue comme un entier en base 2. C'est la clef de **A** par rapport à **B** ; on la note Clef(**A**, **B**). Ici, Clef(**A**, **B**) = 3. Le rapport de la [illegible] [Clef(**A**, **A**) – Clef(**A**, **B**)–Clef(**B**, **A**)]. L'application de l'algorithme de Conway donne [illegible] 1001 = 9 0000 = 0 1000 = 8

**A** PFPP
**B** PPFF PFPP **A** PFPP **B** PPFF
Clef(**A**, **A**) – Clef(**A**, **B**)) = 6

Ainsi, **B** = [illegible] gagne huit fois sur [illegible] contre **B** est : 8/16 + 1) = 4/7

[illegible] ple [illegible] PFF, [illegible] PPF

001 = 1 101 = 5 010 = 2 100 = 4

**B** PPF [illegible] PFP **A** PFP **B** PPF

Clef(**A**, **A**) – Clef(**A**, **B**)) = 4
Clef(**B**, **B**) – Clef(**B**, **A**)) = 2.

Donc **B** = PPF gagne quatre fois quand **A** = PFP gagne deux fois. Dit autrement, la probabilité de gain [illegible]

Le fait que cet algorithme fonctionne correctement est bien sûr difficile à démontrer, mais cela a été fait de plusieurs manières.

[illegible] miracle de l'algorithme de Conway : [illegible] 2 Clef(**A**, **A**) est le temps moyen d'attente de la [illegible] résultats de l'encadré 1, qui indiquaient que le temps moyen d'attente de FF est 6 et que celui de PF est 4.

John Conway présentant un théorème de topologie.

Sous sa forme la plus générale, le problème n'a été résolu qu'en 2006 par Daniel Felix, de l'Université de Californie à San Diego. Cependant, la règle qu'il a trouvée (et qui vaut même si on remplace la pièce de monnaie par un dé à $k$ faces) est trop complexe pour être décrite ici. Heureusement, la règle suivante, proposée par Mark Andrews en 2004, même si elle ne donne pas la meilleure probabilité de gain possible, marche très bien et s'applique de tête :

Face à une séquence S choisie par le premier joueur, prenez, pour le premier élément de votre séquence S', le deuxième élément de S en l'« inversant », puis faites suivre ce premier élément par la séquence S sans son dernier élément. Si par exemple votre adversaire choisit S = PPFPFPPF, vous repérez le deuxième élément de sa séquence, P, vous l'« inversez » et obtenez F, que vous faites suivre de la suite de l'adversaire sans le dernier F, ce qui vous donne S' = FPPFPFPP. L'algorithme de Conway indique que vous gagnerez alors avec une probabilité de 123/188=65,42, soit presque 2/3. Leonidas Guibas et [illegible] ont établi que la meilleure façon de répliquer au choix du premier joueur ne peut être que la séquence donnée par la méthode de M. Andrews, ou la même séquence dont le premier symbole est inversé. De plus, quelle que soit la façon dont joue le premier joueur, pour toute séquence de longueur au moins trois, il existe une façon de lui répliquer qui donne au second joueur une probabilité de gagner supérieure à 9/14 = 0,6428.

Notre intuition des problèmes probabilistes est souvent dans l'erreur, car elle généralise de façon précipitée certaines règles habituellement valides, mais ayant des exceptions, comme celle indiquant que la force d'un joueur à un jeu est une propriété indépendante de l'adversaire. Notre intuition manque de finesse en confondant le gagnant d'une compétition entre deux séquences et la séquence ayant le plus court temps d'attente moyen. Le travail du mathématicien consiste alors à démêler la confusion qui résulte des fausses évidences du bon sens, et à montrer que là où l'on voyait un paradoxe ne règne en définitive qu'un jeu de subtilité mathématique. ■

### BIBLIOGRAPHIE


E. Pegg, **How to Win at Coin Flipping**, novembre 2010 : http://blog.wolfram.com/2010/11/30/how-to-win-at-coin-flipping/

R. Nickerson et P. Ante, **Counterintuitive probabilities in coin tossing**, *The UMAP Journal*, vol. 28, pp. 523-532, 2007.

D. Felix, **Optimal Penney Ante strategy via correlation polynomial identities**, *The Electronic Journal of Combinatorics*, vol. 13-1, R35, 2006.

M. W. Andrews, **Anyone for a nontransitive paradox? The case of Penney Ante**, prépublication, 2004 (m.andrews@ucl.ac.uk).

S. Collings, **Coin sequences, probabilities and paradoxes**, *Bull. of the Inst. of Math. and its Applic.*, vol. 18, pp. 227-232, 1982.

L. Guibas et A. Odlyzko, **String overlaps, pattern matching, and nontransitive games**, *Journal of Combinatorial Theory*, vol. A30-2, pp. 183-208, 1981.


© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

IDÉES DE PHYSIQUE

# Petite goutte deviendra grande

*Pour devenir de la pluie, l'eau des nuages doit former des gouttes de taille millimétrique. Cette croissance, moins aisée qu'il n'y paraît, conjugue plusieurs phénomènes.*

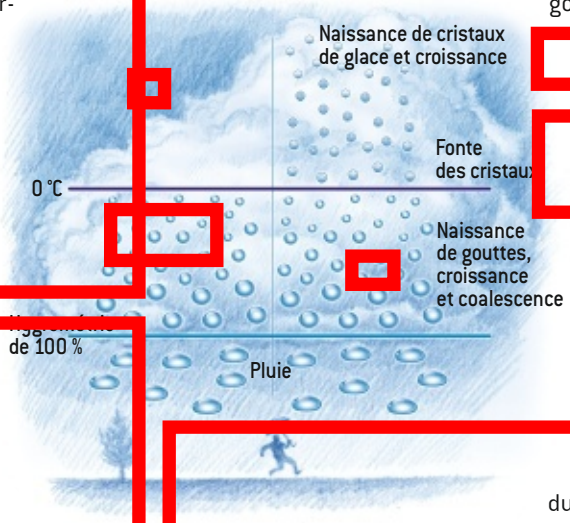
**Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK**

L'horizon dégagé se couvre brusquement, un cumulonimbus envahit le ciel et, une demi-heure plus tard, tombe une averse drue. Comment la vapeur d'eau de l'atmosphère a-t-elle pu se transformer en pluie en un si court laps de temps ? Ce processus apparemment simple nécessite l'enchaînement de plusieurs phénomènes physiques, de la naissance d'une gouttelette microscopique jusqu'à ce que sa taille atteigne le millimètre. Pour comprendre comment un milliard de milliards de molécules d'eau se regroupent, prenons un peu d'air automnal humide et suivons-le dans son périple.

## Une naissance délicate

Pour que de la pluie tombe, il faut d'abord que se forme un nuage, constitué d'un brouillard de fines gouttelettes d'eau. La condition nécessaire est que l'air ait une teneur en eau suffisante, c'est-à-dire qu'il soit sursaturé : il contient alors plus de vapeur d'eau qu'une valeur seuil, dépendant de la température. À 5 °C, cette quantité est de l'ordre de sept grammes par mètre cube. On dit alors que le degré d'hygrométrie atteint 100 pour cent. Mais cette condition n'est pas suffisante, car l'humidité peut dépasser cette valeur sans que ne se forme de nuage.

Pourquoi ? Tout d'abord, parce que lorsque les molécules d'eau sont peu nombreuses à s'être agrégées, l'énergie apportée par une molécule qui se colle à la gouttelette naissante échauffe souvent assez cette dernière pour qu'une autre molécule s'échappe ; dans une grosse goutte, cette énergie se répartit entre toutes les molécules présentes et a un effet relativement faible. Ensuite, parce que l'énergie qui maintient une molécule liée à une microgouttelette est d'autant plus faible que la goutte est petite ; il est plus aisé pour une molécule d'eau de s'échapper de l'attraction exercée par quelques-unes de ses semblables, que d'une gouttelette plus grosse.



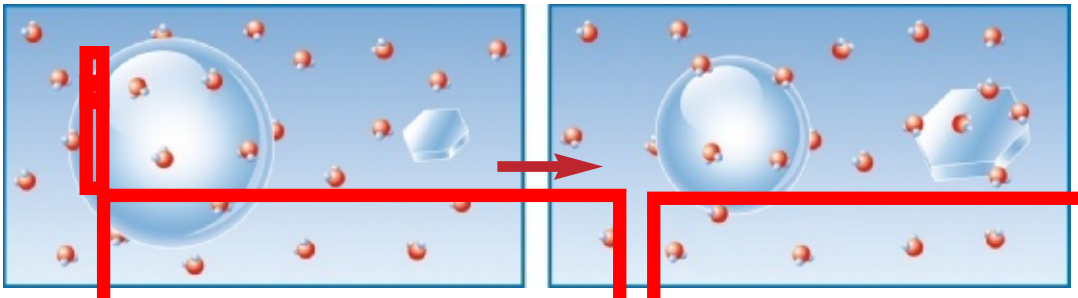

**1. LA BASE D'UN NUAGE CORRESPOND** à l'altitude à partir de laquelle l'air est en sursaturation (degré d'hydrométrie supérieur à 100 pour cent). Dans la partie basse du nuage, des gouttelettes naissent sur des noyaux de condensation et croissent très lentement. Quand leur taille est suffisante, elles tombent assez vite pour s'agglomérer au passage des gouttelettes plus petites, ce qui les fait grossir encore plus et tomber en pluie *(à gauche sur le dessin)*. Dans la partie haute du nuage *(à droite sur le dessin)*, où la température est inférieure à 0 °C, ce sont des cristaux de glace qui naissent et croissent aux dépens des gouttes par un effet dit Bergeron. Au-dessous de 0 °C, les cristaux fondent et deviennent de la pluie comme dans la situation précédente.

Cela signifie que pour une teneur donnée en vapeur d'eau, il existe une taille critique pour laquelle les gouttelettes plus petites s'évaporent, tandis que les plus grosses vont continuer de grossir : c'est la taille pour laquelle le nombre de molécules d'eau qui s'échappent à chaque instant du noyau de condensation est égal au nombre de celles qui se condensent à partir de l'air environnant. Pour une humidité de 100 pour cent, les microgouttelettes sont stables dès que leur rayon dépasse 0,06 micromètre, ce qui correspond à quelques dizaines de millions de molécules.

Il est fort peu probable que les collisions accidentelles des molécules d'eau puissent engendrer un tel monstre à l'échelle moléculaire. Heureusement, l'atmosphère contient des particules solides ou liquides en suspension. Rapidement gorgées ou recouvertes d'eau, dont elles sont avides, elles jouent alors le rôle de noyau de condensation pour les molécules d'eau.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011



Dessins de Bruno Vacaro

**2. L'EFFET BERGERON EXPLIQUE LA CONDENSATION** plus rapide de la vapeur d'eau dans les nuages froids. Lorsque coexistent des gouttelettes et des cristaux, les molécules d'eau de la vapeur environnante sont plus fortement attirées vers les cristaux que vers les gouttes. La croissance des cristaux se fait aux dépens des gouttes, dont l'évaporation s'accélère à mesure que diminue la teneur en vapeur d'eau environnante.

ronnantes, avec une taille initiale qui est au moins celle de la particule, 0,1 à 1 micromètre typiquement. La gouttelette a ainsi la bonne taille pour se développer et son destin semble tout tracé : puisque la condensation l'emporte sur l'évaporation, elle va grossir petit à petit, gagner de la masse et chuter de plus en plus vite.

## Une croissance beaucoup trop lente

Hélas, ce mécanisme de croissance se révèle trop lent. En effet, quand la vapeur se condense sur la goutte, il apparaît dans son voisinage un déficit d'eau qui n'est comblé que par la diffusion, vers la goutte, de molécules d'eau plus éloignées. Par ailleurs, la condensation s'accompagne d'une libération d'énergie au niveau de la goutte, énergie qui n'est évacuée que lentement, par diffusion de la chaleur dans l'air ambiant : la goutte reste souvent plus chaude que son environnement.

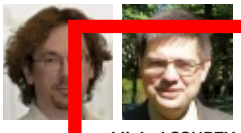
Ces deux effets ralentissent la croissance et le calcul montre que le rayon de la goutte croît, comme dans tous les processus de diffusion, à peu près comme la racine carrée du temps. Ainsi, à 0 °C, sous 0,9 atmosphère, une gouttelette de 0,75 micromètre met près de trois heures pour atteindre 20 micromètres de rayon ! Le rayon millimétrique est encore très loin…

Dans les nuages froids, à moins de 0 °C, un autre mécanisme accélère le processus. Au sein du nuage coexistent, au moins initialement, gouttes en surfusion et cristaux de glace, même pour des températures de –10 °C ou –20 °C. Toutefois, la glace étant un état ordonné de la matière, la cohésion entre molécules y est plus forte que dans l'eau liquide. Il est ainsi beaucoup plus difficile à une molécule d'eau de s'extraire d'un cristal de glace que d'une gouttelette. À taille égale, la concentration en vapeur d'eau pour laquelle il y a équilibre entre départs et arrivées de molécules est bien plus faible pour les cristaux que pour les gouttes ; à –12 °C, la différence atteint deux grammes par mètre cube.

Quelle est la conséquence ? Imaginons que la teneur initiale en vapeur soit élevée : les molécules d'eau se fixent aussi bien sur les gouttes que sur les cristaux, même si c'est plus rapidement sur ces derniers. En raison de ces dépôts, la teneur en vapeur diminue ensuite peu à peu jusqu'à passer sous la teneur critique pour les gouttes : dans ce cas, le liquide s'évapore. Toutefois, comme cette teneur en vapeur reste plus élevée que la teneur critique de la glace, la vapeur continue de se condenser sur les cristaux. La teneur en vapeur continuant à baisser, l'évaporation des gouttes s'accélère jusqu'à leur complète disparition. Les cristaux ont ainsi cannibalisé à distance les gouttes ! C'est l'effet Bergeron, du nom de Tor Bergeron, le météorologiste suédois qui l'a décrit en 1935.

L'effet Bergeron explique la croissance plus rapide des agrégats d'eau dans les nuages froids, mais il ne permet pas à lui seul de tout comprendre. Quel est l'ingrédient manquant ? La chute des gouttes ou

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://blog.idphys.fr

### BIBLIOGRAPHIE

B. J. Mason, **The Physics of Clouds**, Oxford University Press (2e édition, 1971), réimp. 2010.

### SUR LE WEB

**Site de Météo France :**
http://comprendre.meteofrance.com/pedagogique/pour_tous/

.fr Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur www.pourlascience.fr

Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer
L.E.C.M.A

## APPEL A CANDIDATURE

### POUR DES BOURSES POUR LA RECHERCHE BIOMEDICALE ET CLINIQUE FONDAMENTALE SUR LA MALADIE D'ALZHEIMER

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

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

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

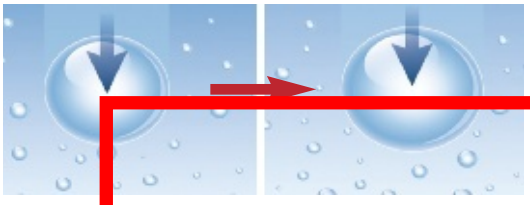
**Les candidatures pour des projets franco-allemands et franco-hollandais** peuvent être déposées par des chercheurs en France, en Allemagne ou aux Pays-Bas. La valeur ajoutée de ces projets coopératifs doit être significative dans le domaine de recherche proposé. Les dossiers de candidature peuvent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

Les subventions accordées seront mises à disposition à partir de novembre 2012.

La date limite d'envoi des lettres d'intention est le **14 mars 2012**. Elles doivent être rédigées en anglais et envoyées à : e.wiese@alzheimer-research.eu.
Un original et une copie doivent être envoyés à :
Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer
94 rue La Fayette, 75010 Paris.

*Des informations complémentaires et le formulaire de lettre d'intention sont accessibles sur :*
***www.maladiealzheimer.fr***
*Pour toute question, merci de contacter le Dr Ellen Wiese, PhD (coordinatrice scientifique internationale) au :*
***+ 49-211-86-20-66-21***
*ou par email :*
***e.wiese@alzheimer-research.eu***

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

**3. LA VITESSE DE CHUTE** d'une goutte dépend de sa taille. Les gouttes plus grosses tombent plus vite que les petites. Comme plusieurs tailles coexistent initialement, les grosses gouttes d'eau amassent lors de leur chute des gouttelettes plus petites et augmentent ainsi rapidement de volume. C'est cet effet de cannibalisation qui explique la rapidité avec laquelle la pluie peut tomber après la formation d'un nuage.

des cristaux. À mesure que le rayon de la goutte augmente, sa masse et son poids croissent. Le frottement aérodynamique de la goutte avec l'air croît aussi, mais moins vite. Ainsi, plus la goutte est grosse, plus elle tombe vite : la vitesse est de 5 centimètres par seconde pour un rayon de 40 micromètres, de 4 mètres par seconde pour un rayon de un millimètre.

Une première conséquence est que l'on comprend dès lors pourquoi un nuage ne tombe pas. Pour des tailles micrométriques, les vitesses de chute sont très faibles : même en l'absence de vent ascendant, il faudrait six heures pour un nuage constitué de gouttes de 40 micromètres pour descendre de un kilomètre.

## Les petites gouttes rattrapées par les grandes

Seconde conséquence : des gouttes de tailles différentes ne tombent pas ensemble. Les grosses gouttes rattrapent les petites, entrent en collision avec elles et grossissent en les cannibalisant. Pour que ce mécanisme soit efficace, il faut que les gouttelettes formées lors de la condensation initiale aient des tailles différentes : si toutes les gouttelettes se formaient et grossissaient au même rythme, elles tomberaient ensemble et ne pourraient pas fusionner !

Mais le hasard fait bien les choses. Toutes les étapes initiales résultent de processus aléatoires, ce qui conduit à une dispersion notable des rythmes de croissance, et donc des tailles. Après une phase initiale, lorsque les gouttes sont assez grosses pour tomber, quelques-unes, plus grosses que les autres, vont attraper les plus petites, et ce d'autant plus vite qu'elles grossissent. Ce mécanisme de coalescence devient dominant au-delà de 40 micromètres. C'est lui qui explique, *in fine*, que la pluie peut tomber une demi-heure après la formation d'un nuage.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

# La Transmission de patrimoine, moteur du progrès médical

FONDATION RECHERCHE MÉDICALE

Organisme indépendant, la Fondation pour la Recherche Médicale agit grâce à la générosité de plus de 400 000 donateurs.
**Il existe plusieurs possibilités de soutenir la Fondation :** en faisant un don, une donation, une donation temporaire d'usufruit, une succession, en souscrivant une assurance-vie en faveur de la Fondation. **Vous bénéficiez** d'un avantage fiscal*.
Depuis 6[illegible] ans, la Fondation pour la Recherche Médicale lutte contre toutes les pathologies, sans distinction.
**En choisissant d'être à ses côtés vous agissez pour votre santé et celle de vos proches et vous jouez un rôle essentiel dans le maintien, en France, d'une recherche de très haut niveau.**

*Pour les personnes assujetties à l'impôt de solidarité sur la fortune (ISF), réduction d'impôt de 75% du don dans la limite de 50 000 euros (loi Tépa). Hors ISF, la réduction d'impôt est de 66% du montant du don dans la limite de 20% du revenu imposable. Si les dons dépassent cette limite, l'excédent est reportable sur les 5 années suivantes.

**Depuis sa création par le Pr Jean Bernard en 1947, la Fondation soutient la recherche médicale dans tous les domaines :** cancers, maladies neurologiques, maladies infectieuses, maladies cardiovasculaires, maladies des os, maladies du système immunitaire, maladies du sang[illegible].
Son Conseil scientifique composé de 22 chercheurs de haut niveau, représentant toutes les disciplines médicales et scientifiques, sélectionne les projets qui seront soutenus.
**Chaque année, la Fondation finance, en moyenne, plus de 350 projets.**

La Fondation s'engage à rendre compte de ses activités, met à disposition son rapport d'activité sur son site, envoie ses comptes à l'ensemble de ses donateurs. Ses comptes sont certifiés par un commissaire aux comptes indépendant.

AGRÉÉE PAR COMITÉ DE LA CHARTE don en confiance

**La Fondation pour la Recherche Médicale est agréée par le Comité de la Charte du don en confiance et reconnue d'utilité publique.**

**Pour plus d'informations**

Stéphanie Clément-Grandcourt
Responsable philanthropie
01 44 39 75 98 • stephanie.clement-grandcourt@frm.org

Céline Ponchel-Pouvreau
Responsable libéralités et succession
[illegible]ne.ponchel@frm.org

**FONDATION POUR LA RECHERCHE MÉDICALE, 54 RUE DE VARENNE 75007 PARIS - www.frm.org**

Coupon à retourner à **Fondation pour la Recherche Médicale**

☐ Je fais un don de.....
☐ Je souhaite recevoir, sous pli confidentiel, la brochure philanthropie
☐ Je souhaite recevoir, sous pli confidentiel, la brochure sur les legs, donations et assurances-vie
Ces demandes ne m'engagent en aucune façon.

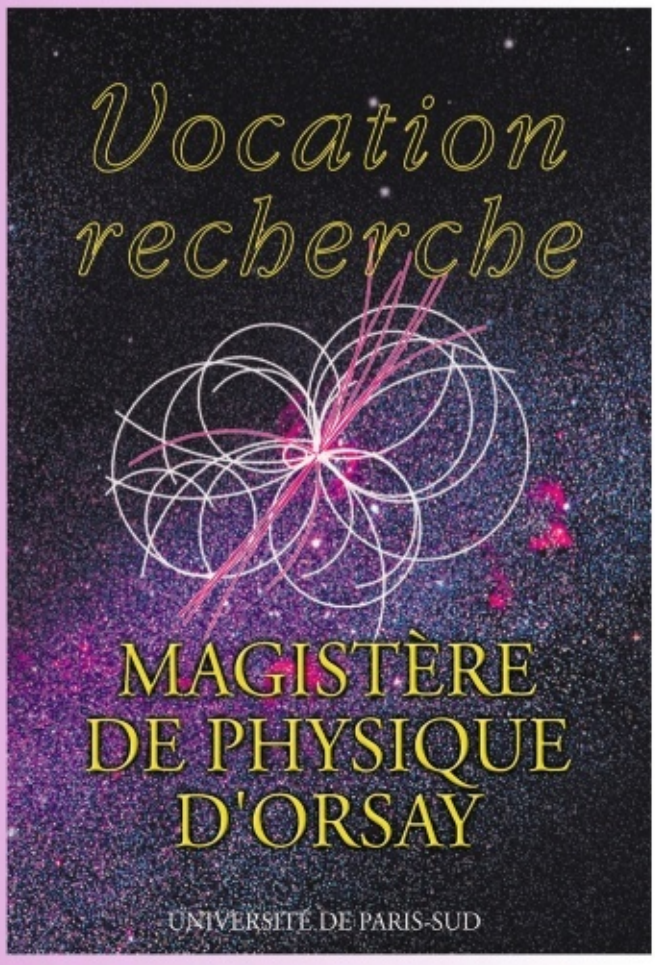
PFPLS111

Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : ..... Code postal : .....
Ville : ..... Téléphone : .....

Conformément à la loi du 6/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et d'opposition aux informations vous concernant, en vous adressant à la Fondation. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. Si vous ne le souhaitez pas, vous pouvez cocher la case ci-jointe. ☐

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*

SCIENCE & GASTRONOMIE

# Pour faire des sablés tendres…

*… il faut cuire la farine. Oui, mais quand ? Étudions les différents effets de la pyrolyse.*

**Hervé THIS**

Jean-Michel Thiriet

Il est toujours bon de questionner les pratiques anciennes, en cuisine comme ailleurs. Le sujet de cette chronique sera la farine et sa cuisson.

Les « blancs », en cuisine, ne sont pas nécessairement des blancs d'œufs, mais aussi des liquides de cuisson. Appliquons cette acception aux artichauts : on sale de l'eau, on y ajoute le citron avec lequel on a frotté un fond d'artichaut qui a été paré, débarrassé de ses feuilles et de son foin, et qui brunirait si l'acide ascorbique du jus de citron ne venait pas bloquer l'action des enzymes brunissantes. Certaines cuisines traditionnelles ajoutent de la farine dans cette eau de cuisson, nommée blanc. Pourquoi ? Rien ne vaut l'expérience… qui n'a pas montré d'avantage gustatif clair à cet ajout.

Pourquoi les cuisiniers suivent-ils alors les prescriptions anciennes, même quand elles sont inefficaces ? Pourquoi ne testent-ils pas les prescriptions anciennes ? Parce que, sans une théorie chimique et physique pour guider les tests, ils n'ont aucun moyen d'imaginer quels paramètres pourraient être ou non importants.

Ce qui nous conduit à notre sujet du mois : la production de petits gâteaux, les sablés. On sait que la crainte (souvent justifiée), c'est que les sablés soient durs. Car le praticien, face à une recette inconnue (et il y en a des centaines) sans compréhension chimique et physique, n'a aucun moyen de savoir quelle recette donnera le meilleur résultat.

Les sciences, en revanche, conduisent à des résultats qui guident nos actions culinaires. En effet, la farine utilisée, avec du sucre, du beurre, de l'œuf, pour la production de sablés, est faite principalement de gluten (des protéines) et d'amidon (des polysaccharides de deux types, amylose et amylopectine). Quand on travaille la farine avec un liquide, et l'œuf (le blanc est fait de 90 pour cent d'eau, le jaune de 50 pour cent), les protéines du gluten se lient en un réseau, qui fait les sablés très durs… et pas sablés.

Autrement dit, pour obtenir des sablés bien sablés, il faut éviter la formation d'un réseau protéique. Comment ? En détruisant les protéines, par exemple par chauffage : si l'on cuit de la farine à sec, dans une casserole, on obtient une farine « torréfiée » qui, addition faite de beurre, œuf, sucre, fait des sablés « parfaits ». Mieux encore : lors de ce traitement thermique, la farine prend un goût puissant, qui hésite entre le champignon, quand la couleur est blonde, et le chocolat, quand la cuisson est plus poussée.

D'ailleurs, est-il alors besoin de cuire le mélange d'œuf, de beurre, de sucre, de farine torréfiée ? En réalité, la cuisson est faite, et sauf à vouloir provoquer la caramélisation du sucre, d'une part, la formation d'hydrogène sulfuré pour donner un goût d'œuf, d'autre part, ce chauffage est peut-être inutile. Bien pour des pâtes à tartes, ou toute autre préparation contenant de la farine !

Ce qui doit aussi nous conduire à comprendre pourquoi la farine torréfiée a un goût de chocolat : mais, au fait, le chocolat n'est-il pas, aussi, une matière végétale que l'on torréfie ? En prenant un peu de recul chimique, on devra considérer que les « réactions de Maillard », qui contribuent à la croûte du pain, à la croûte du rôti, ne sont pas les réactions dominantes qui donnent du goût aux aliments, loin s'en faut. La torréfaction de la farine n'est pas une réaction de Maillard, mais s'apparente plutôt à une pyrolyse (la pyrolyse est la décomposition d'un composé organique par la chaleur, sans flamme).

Évidemment le changement de nom, utile pour les puristes, sera jugé secondaire par les praticiens… mais ceux-ci se reprendront peut-être quand ils apprendront que, depuis des années, se publie chaque mois un *Journal of Pyrolysis*, qui rapporte les innombrables études des pyrolyses des divers composés organiques. On ne trouve pas (encore) de considérations sur les sablés dans ce journal, mais la formation de bisques (de crevettes, de langoustines…) est une pyrolyse, et, d'ailleurs, ce sont des composés de type polysaccharidique nommés chitosanes qui contribuent au merveilleux goût de ces potages. Pour les champignons sautés, la pyrolyse des chitosanes est également à l'œuvre selon la façon dont on cuit, car les champignons, comme les carapaces de crustacés et les cuticules d'insectes, contiennent également des chitosanes.

Exposons la pyrolyse : à quand les bisques de grillon, de scorpion, de fourmis (lesquelles apporteraient une délicate acidité, en raison de l'acide formique qu'elles produisent) ?

*Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).*

.fr Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

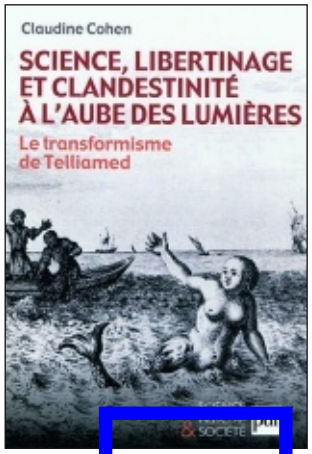
→ HISTOIRE DES SCIENCES

## Science, libertinage et clandestinité à l'aube des Lumières

**Claudine Cohen**

PUF, 20[illegible]
(433 pages, 36 euros).

*Telliamed* : ce livre au titre étrange (l'anagramme du nom de son auteur), publié en 1748, est régulièrement cité dans les ouvrages traitant de l'histoire des sciences naturelles. Benoît de Maillet (1656-1738), son auteur, est souvent présenté soit comme un illuminé aux idées farfelues, soit comme un remarquable précurseur de l'évolutionnisme. Comme le montre fort bien Claudine Cohen dans ce livre, la réalité est plus complexe, et plus intéressante. Consul de France au Caire à la fin du règne de Louis XIV, il place dans son livre les « entretiens d'un philosophe indien avec un missionnaire français », tous deux parfaitement imaginaires. Le missionnaire n'est guère qu'un faire-valoir, c'est le philosophe indien qui présente au lecteur les conceptions de notre consul sur l'histoire de la Terre et des êtres vivants. L'idée fondamentale est la « diminution de la mer » : le globe a été à l'origine entièrement recouvert par les eaux marines, dont le niveau a ensuite constamment baissé. Ce retrait n'a pas seulement formé les reliefs terrestres, il a aussi conduit les organismes marins à se transformer, pour donner des êtres capables de vivre à l'air libre. Certains poissons se sont métamorphosés en oiseaux et, quant aux humains, ils dérivent de sirènes et autres hommes marins.




Ces conceptions, où certains veulent voir les prémisses des théories de l'évolution, s'inscrivent dans une vision du monde tout à fait matérialiste, impliquant des durées très longues, et qui va complètement à l'encontre du dogme religieux d'alors. Rien d'étonnant donc à ce que le *Telliamed* ait longtemps circulé « sous le manteau », sous forme de manuscrits clandestins, à l'instar d'autres œuvres libertines en ce début du XVIIIe siècle, pour n'être enfin édité, en Hollande, que dix ans après la mort de son auteur, après avoir été quelque peu édulcoré.

Cl. Cohen s'attache à reconstituer la mentalité et les idées du consul de Maillet, bien en cour et influencé par des philosophes aussi notables que Descartes et Fontenelle, mais n'hésitant pas, pour apporter de l'eau à son moulin, à accumuler des anecdotes parfois invraisemblables. Pour autant, il serait absurde de juger *Telliamed* à l'aune des connaissances d'aujourd'hui, et l'auteur au contraire le replace dans son époque, alors que les sciences modernes débutaient. Une fois de plus, Cl. Cohen nous donne un bel ouvrage d'histoire des sciences, d'une grande érudition, et que son style limpide rend agréable à lire.

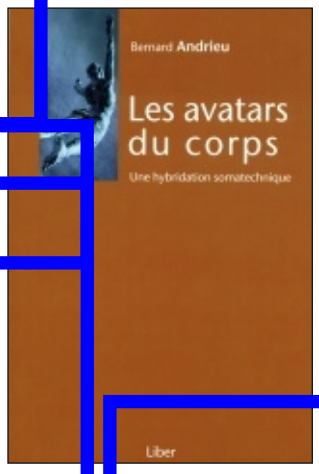
→ Eric Buffetaut
*CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris*

→ SCIENCES HUMAINES

## Les avatars du corps

**Bernard Andrieu**

Liber, 2[illegible]
(158 pages, 22,50 euros).




Tout le monde avait prédit que l'individualisme allait prendre, dans les sociétés démocratiques, une tournure pathétique et engendrer angoisse, fragilité et désarroi existentiel. Ce que, au début du XIXe siècle, il ne pouvait prévoir, c'est combien la technique, à première vue confortante et sécurisante, contribuerait à accroître la vulnérabilité de l'individu en le livrant à des machines lui permettant de se débarrasser de l'humain en lui. L'auteur livre ici l'inventaire des ressources disponibles pour échapper aux déterminismes biologiques, tout en satisfaisant apparemment aux aspirations individualistes hédonistes. Son livre est un manifeste dédié aux expériences de sorties de soi, censées permettre une réappropriation et un remodelage du corps. Ce sont les produisent ce qu'il nomme les avatars.

B. Andrieu enquête au pays de ceux qui refusent d'être ce qu'ils sont et partagent la conviction que notre malheur provient du fait que nous sommes nés seulement par hasard. À dire vrai, la sortie de soi est déjà permise par la technique, pour peu que l'on consente à l'hybridité. « Être hybride est une nouvelle possibilité de l'être corporel par le mélange des genres, des sexes, des cultures, des techniques et des corps. Accepter l'hybridité, c'est admettre que le corps n'est ni entièrement naturel ni entièrement culturel… » Le livre de B. Andrieu prospecte les domaines où l'on affiche cette résolution à miser sur l'hybridité. Le bio-art, par exemple, où la sortie de soi peut prendre la forme d'une dérisoire exhibition du plus intime – comme celle assumée par Chrissy Blount qui entreprend de vendre ses ovules comme du « caviar humain ». Ou encore, la pornographie où l'on suggère que l'extase organique peut s'obtenir par des artefacts plus ou moins sophistiqués. Nombre d'expériences sont convoquées pour témoigner de la propension à ne pas s'en laisser conter par la nature : ainsi celle du « chat enceint » joué par une femme « transgenrée » en homme. Toute expérience conçue pour se rendre étranger à soi-même, pour déconstruire le corps et modifier le schéma corporel, est bonne à invoquer. Ces dissociations corps-esprit (*out-of-body experiences*) sont devenues fréquentes. Quoi de plus banal désormais, que l'immersion du corps dans le lieu virtuel créé par une console *Wii* ?

La dimension politique n'échappe pas non plus à B. Andrieu : il la voit directement exprimée par la mobilisation du *gender* (du genre) dans la contestation, par le transsexualisme, de la naturalisation de la différence sexuelle. Elle est aussi sous-jacente aux entreprises d'hybridation de toutes sortes destinées à révéler les potentialités mutantes du vivant et la variété de la création.



© Pour la Science - n° 409 - Novembre 2011

de l'ordre social sur les identités fermées. La revendication révolutionnaire d'un nouveau vécu corporel, apparue déjà avec la contre-culture des années 1960, est plus que jamais actuelle : elle passe par les promesses des biotechnologies en matière de transgenèse, de biologie de synthèse, d'hybridation ou de sélection végétales et animales, d'homogreffe, de manipulation neurophysiologique, de clonage reproductif, de transformation hormonale…

Ne le cachons pas : le livre de B. Andrieu semble souvent se complaire dans le vertige provoqué par la démesure de « la performativité bionique » et de « la transbioculturalité » qu'on peut en attendre. Il ne partage pas les réserves de Peter Sloterdijk qui diagnostique « le glissement rétrograde dans l'insignifiance » accompagnant à ses yeux la frénétique quête d'autosymbiose, d'autoaccouplement, de souci exaspéré de soi. Tocqueville avait raison : l'individualisme démocratique ne pouvait échapper au pathétique.

➜ Jean-Michel Besnier
*Université Paris X Nanterre*

➜ MATHÉMATIQUES

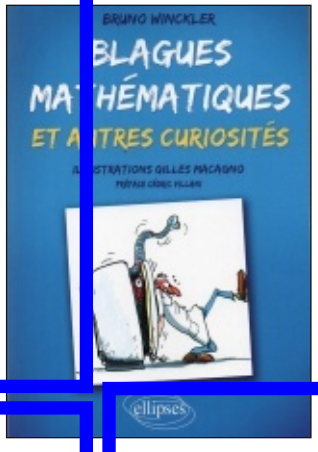
## Blagues mathématiques et autres curiosités

**B. Winckler et G. Macagno**
Ellipses, 2011
(240 pages, 11 euros).

Préfacé par Cédric Villani (médaille Fields 2010), ce recueil contient trois types de blagues : celles que le lecteur ne connaissait pas et celles qu'il connaissait déjà.

Si les lignes précédentes ne vous ont pas fait sourire, le recueil n'est sans doute pas pour vous. Elles s'inspirent en effet d'une facétie classique parmi les mathématiciens (dûment apportée par Bruno Winckler), qui consiste à ce qu'un collègue vous prenne à part, pour vous annoncer d'un ton pénétré : « Il y a trois types de mathématiciens : ceux qui savent compter, ceux qui ne savent pas compter. »

B. Winckler a collecté les blagues (parfois un peu potaches) que les mathématiciens se racontent, ainsi que des historiettes mettant




en scène leurs travers. Le lecteur non mathématicien ne saura peut-être pas toujours où il faut rire, car certaines astuces lui échapperont. Le lecteur mathématicien, lui, aura tantôt le plaisir de rire aux blagues qu'il découvre, tantôt la fierté de se sentir membre de la famille en lisant celles qu'il connaissait. Exemples :

« La théorie de l'humour mathématique a toute une histoire : Georg Cantor (1845-1918) avait prouvé l'existence de blagues de mathématiques, mais sa preuve n'était pas constructive. »

« Un mathématicien décide qu'il lui serait utile d'en apprendre plus sur les problèmes pratiques. Il voit un séminaire avec un titre aguicheur : "La théorie de l'engrenage". Il y va donc. Le conférencier se lève et commence : "La théorie de l'engrenage avec un nombre pair de dents est maintenant bien connue..." »

« Pourquoi pour les Romains l'algèbre n'était-elle pas vraiment intéressante ? Réponse : parce que X était toujours égal à 10. »

« Pourquoi les mathématiciens appliqués ont-ils peur de conduire ? Réponse : parce que la largeur de la route est négligeable devant sa longueur. »

« Doit-on dire : "Tous les nombres premiers sont impairs sauf un", ou "Tous les nombres premiers sont impairs sauf deux" ? » Jolie illustration de la difficulté qu'il y a à formaliser le langage, cette question-là reste sans réponse !

Terminons par une boutade attribuée à Russell, aussi profonde que bien des dissertations d'épistémologie : « L'histoire des sciences exactes est dominée par l'idée d'approximation. »

Édition Landon

➜ ÉGYPTOLOGIE

## Secrets de momies

**A. Le[illegible]res**
**Fr. P[illegible]udeau (dir.)**
Errance, 2011
(112 pages, 15 euros).

Ce livre, catalogue d'une exposition présentée actuellement à Jublains (Mayenne), après Besançon et Alicante, a pour thème les pratiques funéraires et visions de l'Au-delà en Égypte ancienne. Organisés à partir d'objets provenant essentiellement du Musée des beaux-arts et d'archéologie de Besançon, l'ouvrage, comme l'exposition, ont pour fil conducteur deux personnages, Séramon et Ânkhpakhered, respectivement scribe et dessinateur dans le domaine d'Amon. Ils ont vécu tous deux

### MÉTAPHYSIQUE QUANTIQUE

**S. Ortoli et J.-P. Pharabod**
La Découverte, 2011
(142 pages, 14,5 euros).

Dans un langage clair et accessible, les deux auteurs passent ici en revue la culture que devrait avoir *Homo quanticus*, notre contemporain à la vie aujourd'hui si déterminée par les techniques quantiques. Auteurs de l'un des ouvrages de culture quantique – *Le Cantique des quantiques* – les plus lus dans les années 1980, ils ont voulu rendre compte des spectaculaires avancées accomplies par les physiciens de la quantique depuis un quart de siècle.

### PEUPLEMENTS ET PRÉHISTOIRE EN AMÉRIQUES

**Denis Vialou (dir.)**
CTHS, 2011
(492 pages, 52 euros).

Pareil ouvrage, il n'y en a qu'un tous les 50 ans ! Un rare échantillon de spécialistes y passe en revue le peuplement des Amériques, leurs préhistoires différentes au Nord et au Sud, leurs économies, sans oublier ce que les comportements funéraires de leurs populations nous apprennent sur ces dernières. Un ouvrage de référence incontournable pour quiconque souhaite avoir une vision d'ensemble du passé pré-européen des Amériques.

### HISTOIRE DE L'ÉLECTRICITÉ

**M.-C. de La Souchère**
Ellipses, 2011
(270 pages, 19,5 euros).

Chaque paragraphe de ce livre est intéressant. En retraçant de façon simple mais pertinente l'histoire de l'irruption de l'électricité en Occident, l'auteur nous amène de façon naturelle à remarquer et comprendre les machines électriques qui sont partout autour de nous.

## Brèves

### PETITE MÉTAPHYSIQUE DES JOUETS

**Nicolas Witkowski**
La Martinière, 2011
(176 pages, 20 euros).

Les biographies des grands savants évoquent peu leurs jeux d'enfants. Pourtant, toupies, moulins à vent, ricochets, osselets, bulles furent autant de sources d'inspiration des théories physiques. Promenade poétique, historique et scientifique, cet essai, illustré avec justesse, invite à chercher, derrière ces jouets ancestraux, les lois de la nature. Et à y retrouver notre intuition d'enfant...

### LA GÉNOMIQUE

**Maryline Coquidé, Magali Fuc[illegible], Stéphane Tirard (coord.)**
Vuibert/ADAPT-SNES, 2011
(261 pages, 35 euros).

Aujourd'hui, la génétique est dominée par la génomique, la science qui étudie le matériel génétique d'un individu ou d'une espèce. Avec elle sont apparues de nouvelles questions éthiques, sociales, médicales. Destiné surtout aux enseignants, cet ouvrage dresse un état des lieux didactique de la génomique, de ses enjeux, et propose des pistes pour intégrer ces nouveaux aspects à l'enseignement de la génétique.

### LES RISQUES NATURELS EN 300 QUESTIONS RÉPONSE

**Sylvain Bouley**
Delachaux & Niestlé, 2011
(224 pages, 22 euros).

Tempêtes, orages, canicule, météores, vent solaire, séismes, volcans, glissements de terrain, tsunamis, inondations… Si vous vous posez la moindre question sur [illegible], ce livre est pour vous. Dans un style clair et concis, l'auteur, planétologue, y mêle science, analyses statistiques et conseils.

au Ier millénaire avant notre ère, le premier à la XXIe dynastie, le second aux XXVe-XXVIe dynasties, comme en témoignent leurs ensembles funéraires : double sarcophage et planchette de momie pour l'éternité, simple sarcophage et résille de perles couvrant le corps pour Ânkhpakhered. Bien conservées, les deux momies ont été examinées au scanner, méthode non intrusive qui a permis de préciser les procédés de momification mis en œuvre et de visualiser le trousseau funéraire – amulettes, paquets canopes – disposé entre les bandelettes. Des éléments de mobilier funéraire tels qu'objets de toilette, ouchebtis (serviteurs du mort), vases canopes renfermant les viscères sont présentés dans l'exposition à titre de compléments et de comparaison.

Le catalogue, remarquablement illustré, est précédé de plusieurs chapitres d'introduction. Tout d'abord, deux présentent les collections des musées de Besançon et de Jublains. Un long développement est ensuite consacré au mythe osirien selon Plutarque, mythe qui a inspiré les pratiques funéraires. À cette occasion sont exposées les dernières découvertes sur le culte d'Osiris aux époques tardives, avec la fabrication, chaque année, d'une figurine à son effigie, ensevelie dans des catacombes. Les techniques de momification et les pratiques funéraires mises en œuvre au Ier millénaire permettent de replacer les ensembles funéraires et les objets dans un cadre d'ensemble, tandis que leur contexte historique est rapidement brossé dans un autre chapitre.

Bref, un ouvrage qui intéressera aussi bien le spécialiste que le profane, notamment par ses très belles photographies d'objets, dont certains peu connus, et surtout par les nouvelles techniques mises en œuvre pour révéler de nouveaux « secrets de momies ».

→ **Nadine Guilhou**
*Égyptologue, [illegible]*

### SCIENCES EXPÉRIMENTALES

## Petites expériences scientifiques déjantées et décoiffantes !

**Sean C[illegible]**
Dunod, 2011
(coffret de deux livres, 176 et 192 pages, 19,90 euros).

Ces petits livres amusants se présentent chacun sous la forme de 65 expériences faciles à reproduire chez soi avec du matériel domestique. Pour initier les plus jeunes à la pratique scientifique en s'amusant, pour briller en société avec des expériences qui semblent relever de la magie, ou tout simplement pour approcher la science autrement, ces livres clairs, synthétiques et vulgarisateurs permettent à chacun d'appréhender facilement certains effets physiques, chimiques ou biologiques inattendus et parfois insolites. Chaque

protocole peut être reproduit sans inquiétude, puisque l'auteur a anticipé pour vous tous les risques imaginables et même davantage. Au-delà de l'étonnement suscité par ces expériences, une rapide explication du phénomène responsable est donnée en termes clairs et concis.

Parmi les expériences les plus rapides à mettre en œuvre, mes enfants ont été particulièrement impressionnés par celle du grain de raisin dans le four à micro-ondes, et intrigués par celle du bouchon (non) les bords du verre : ils ont maintenant quelques tours dans leur sac pour épater leurs amis à peu de frais !

En bref, ce coffret constitue un cadeau sympathique joignant l'utile à l'agréable, où l'apprentissage des sciences expérimentales prend une dimension ludique. Il saura attiser la curiosité des jeunes ou des moins jeunes qui s'empresseront de vérifier par eux-mêmes que les expériences fonctionnent vraiment !

→ **Christophe Pichon**
*[illegible] Paris*

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – NOVEMBRE 2011 – N° d'édition 077409-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/168 085 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.