reflets de la PHYSIQUE

n°20
juillet - août 2010

www.refletsdelaphysique.fr

Revue de la Société Française de Physique

# La (regrettable) complexité des systèmes économiques

*Avancées de la recherche*

- Existe-t-il des métaux à deux dimensions ?
- Le calcul scientifique des expériences LHC
- Importance et contrôle des fluctuations dans les systèmes biologiques

www.sfpnet.fr

n°20 - juillet - août 2010 - 10 € - 5 numéros par an

Quiconque travaille sur un campus universitaire n'a pu que constater le nombre croissant d'étudiants en provenance du continent asiatique. On a ainsi vu arriver depuis une dizaine d'années de plus en plus d'étudiants chinois dans toutes les disciplines, scientifiques et littéraires, y compris les sciences physiques. Cela ne fait que traduire l'émergence rapide en science et technologies des pays asiatiques, de la Chine à l'Inde, de Taïwan à Singapour. C'est un fait majeur de notre horizon scientifique, comme on peut le constater avec la présence grandissante d'auteurs asiatiques dans les conférences internationales et les journaux spécialisés.

# Les relations Est-Ouest à l'échelle du continent asiatique

Les Européens ont mis quelque temps à se rendre compte de l'avance prise par les Américains et à réagir pour ne pas leur laisser le champ libre. On s'est par exemple aperçu que le débit des liaisons Internet entre Amérique du Nord et Asie était tellement rapide que toutes les liaisons Europe-Asie, au lieu d'être directes, transitaient par les USA… ce qui indiquait l'intensité de la coopération déjà en cours. En sciences physiques, des membres d'agences de recherche européennes (comme le CNRS) et asiatiques (comme le JSPS au Japon) s'en sont alarmés et ont lancé l'an dernier une initiative pour réfléchir à la coopération entre les deux continents, et renforcer les moyens institutionnels y afférant. Ayant sollicité le concours de la Société Européenne de Physique (EPS) et de *l'Association of Asia-Pacific Physical Societies* (AAPPS), ils ont proposé d'organiser un sommet Asie-Europe en physique, *Asia Europe Physics Summit* – ASEPS. La première réunion plénière de ce sommet s'est tenue en mars dernier à Tsukuba (Japon), pour discuter du développement de coopérations multilatérales à l'échelle du continent[1]. La présence forte d'agences européennes (comme le CNRS, avec plusieurs directeurs d'institut présents) et asiatiques, la signature d'un protocole d'accord entre EPS et AAPPS à cette occasion, sont autant de signes clairs de la volonté d'avancer. La position de la Commission Européenne devra être précisée. Cependant, les discussions à Tsukuba ont surtout été dominées par les échanges sur les grands instruments et grandes infrastructures de recherche, internationaux par nature (et relevant souvent de la physique nucléaire et de la physique des particules). La collaboration en réseau entre équipes de recherche travaillant dans d'autres domaines (physique atomique, matière condensée, information quantique, etc.) n'a pas été abordée sur le fond et devra être incluse dans l'avenir.

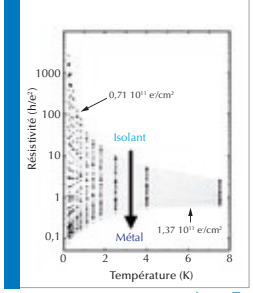
Un domaine de coopération clé pour assurer la mobilité des jeunes asiatiques vers l'Europe, et à peine effleuré lors de la rencontre de Tsukuba, est celui de la formation scientifique. Comment fournir une formation de haut niveau en sciences physiques, dispensée sur place de façon à atteindre les chercheurs débutants dans leur environnement naturel ? Certaines institutions européennes (comme l'Imperial College) ont déjà compris l'importance de cet aspect, et ont passé des accords de coopération avec des universités asiatiques. Les pays européens, et en particulier la France, ont des atouts majeurs à faire valoir dans ce type de coopération, avec les prestigieuses Écoles d'été de Physique établies depuis longtemps en Europe. L'an dernier, durant le mois de juillet 2009, a été organisée à Singapour une session d'été de l'École des Houches (la première hors d'Europe) sur « gaz ultra-froids et information quantique », avec des enseignants venus de France, d'Europe et d'Asie. Cette école a été un grand succès, rassemblant une soixantaine d'étudiants dont plus de la moitié en provenance d'Asie[2]. La suite donnée à cette expérience d'un genre nouveau sera un test de l'ouverture à l'international de la formation scientifique de haut niveau, et de l'absence de frilosité des institutions françaises.

Finalement, un enjeu à plus long terme concerne les publications scientifiques. On peut constater une présence accrue d'articles de groupes asiatiques dans les revues européennes et américaines. Le niveau scientifique de ces articles s'améliore régulièrement. La survie des journaux scientifiques européens passera peut-être par des accords de partenariat avec leurs correspondants asiatiques. Tout cela devrait être inclus dans l'initiative Asie-Europe en cours.

**Martial Ducloy**

(1) http://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=2481
(2) www.ntu.edu.sg/ias/PastEvents/LHSOPS09/Pages/default.aspx

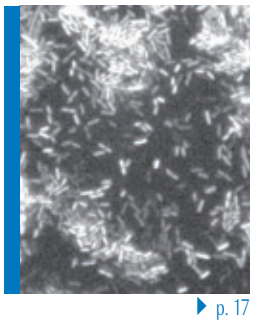
# Sommaire



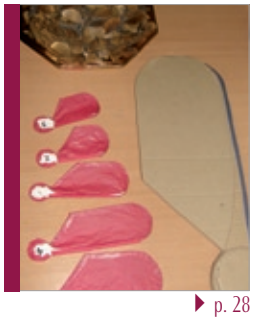

p. 7

Source : GridPP

p. 13



p. 17



© Pascal Sonneville.

p. 28

En couveture :
Diagrammes financiers.
Voir article p. 22.
© Petrovich9, enot-poloskun


## Éditorial

2 Les relations Est-Ouest à l'échelle du continent asiatique
Martial Ducloy

## L'invité

4 Restructurer le baccalauréat ?
Daniel Bloch

## Avancées de la recherche

6 Existe-t-il des métaux à deux dimensions ?
Geneviève Fleury et Xavier Waintal

10 Volcan islandais : adaptation d'un laser « Lidar » pour observer les cendres volcaniques

11 Le calcul scientifique des expériences LHC : une grille de production mondiale
Fairouz Malek

16 Confirmation expérimentale des théories sur la surfusion, ou pourquoi l'eau ne gèle pas dans les nuages

16 Le plus grand télescope au monde sera situé au Chili

17 Importance et contrôle des fluctuations dans les systèmes biologiques
Bahram Houchmandzadeh et Irina Mihalcescu

## Science et société

22 La (regrettable) complexité des systèmes économiques
Jean-Philippe Bouchaud

## Au sein et autour de la SFP

27 Prix scientifiques

28 XVII^e concours national des Olympiades de Physique France

29 Une enquête auprès des doctorants en physique

30 Hommage à Eduardo Pasquini

31 Évry Schatzman : le fondateur de l'école française d'astrophysique théorique

32 EDP Sciences

## Reflets de la physique et ses lecteurs

33 Notes de lecture



**Comité de rédaction**
**Président :** Jean-Pierre HULIN
**Membres :** Patricia BASSEREAU - Michel BELAKHOVSKY - Fabienne CASOLI - Anne DAVAILLE - Étienne GUYON - Pascale HENNEQUIN - Stéphane LABROSSE - Georges LANDA - Roland LEHOUCQ - Jérôme MARGUERON - Vincent MOSSER - Charles de NOVION - Sophie REMY - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Jean VANNIMENUS - Christophe YÈCHE



**Directeur de la publication :** Mohamed DAOUD
**Rédacteur en chef :** Charles de NOVION
**Conception :** Laetitia MORIN - Keith VILLEMEUR
**Réalisation graphique :** Laetitiamorin@free.fr
**Suivi de rédaction :** Agathe CYMER
**Service publicité :** Jessica EKON
Tél. : 01 69 18 92 40
e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 3^e trimestre 2010
ISSN : 1953-793X – e-ISSN : 2102-6777
©SFP - Édité à 3700 exemplaires
**Imprimerie Jouve**,
11, bd de Sébastopol,
75036 Paris Cédex 01
Tél. : 01 44 76 54 40.

**Société Française de Physique**,
33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
e-mail : sfp@sfpnet.org
Serveur : www.sfpnet.fr
SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,
11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris
e-mail : sfp-bulletin@ihp.jussieu.fr
Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

# Restructurer le baccalauréat ?

**Dans son projet de « Nouveau lycée », le ministre de l'Éducation nationale met en avant deux objectifs. D'une part – c'est le premier objectif – « rééquilibrer » les différentes séries et spécialités du baccalauréat : la série scientifique de la voie générale serait aujourd'hui « surdimensionnée » et sa suprématie par trop « écrasante », elle « détournerait » des élèves à son profit. D'autre part – c'est le second objectif – spécialiser davantage les classes terminales pour « mieux préparer aux enseignements supérieurs ».**

**Daniel Bloch, ancien directeur des enseignements supérieurs, nous donne son point de vue. Ces objectifs ainsi mis en avant sont-ils justifiés ? En d'autres termes, formons-nous trop de bacheliers scientifiques ? Les programmes de formation du baccalauréat scientifique sont-ils trop généralistes pour assurer des poursuites d'études réussies dans l'enseignement supérieur ? Et s'il faut rééquilibrer les baccalauréats, au profit notamment de la série littéraire, la nature et le volume des enseignements proposés permettent-ils d'assurer la réussite ultérieure des bacheliers ?**

## Rééquilibrer les différentes séries du baccalauréat ?

Si la *série scientifique* du baccalauréat constitue, au lycée, une voie sans échec, puisqu'en une ou deux sessions pratiquement tous les candidats obtiennent leur diplôme [1], elle se distingue aussi en cela qu'elle ouvre sur une large diversité de parcours dans l'enseignement supérieur, avec de très grandes chances de réussite. Pratiquement aucun bachelier de la série scientifique n'en sort sans diplôme [2]. Les lycéens et leurs familles savent que la voie lycéenne scientifique, même si elle ne se parcourt pas sans efforts, conduit à un baccalauréat dont la qualité, ainsi établie, résulte essentiellement du caractère général et équilibré des enseignements dispensés. La spécialisation recherchée des enseignements en classe terminale scientifique, dans le cadre du projet du « Nouveau lycée », se traduit ainsi par davantage de mathématiques et moins d'histoire et de géographie. Cette évolution, même si elle n'est que modérée, va dans le sens de la réduction du caractère généraliste de la série scientifique, pour repousser des élèves vers d'autres séries du baccalauréat général – ce qui est l'objectif visé – en même temps qu'elle contribue à restreindre les choix offerts aux bacheliers scientifiques. Les lycéens ont plus à y perdre qu'à y gagner.

Si le baccalauréat général comporte une seule série scientifique, deux séries cohabitent en lettres et en sciences humaines : la série littéraire et la série économique et sociale. La *filière littéraire* doit être profondément réformée : en effet, si les bacheliers des séries littéraires rencontrent autant de difficultés tout au long de leur parcours dans l'enseignement supérieur, c'est surtout en raison de ce que leur baccalauréat n'est nullement un baccalauréat général. Les réformes homéopathiques proposées aujourd'hui n'y changeront rien. Les enseignements de lettres et de sciences humaines sont bien présents dans la série scientifique, et rien ne justifie que leur part soit réduite, alors que les enseignements à caractère scientifique voire relevant de la culture technologique, n'apparaissent qu'à trop faible dose dans la série littéraire.

Dans le secteur des lettres et sciences humaines, la *série économique et sociale* relève d'une dynamique spécifique. À l'inverse de la série littéraire dont les effectifs se sont effondrés, elle connaît un développement spectaculaire. Désormais, près du tiers des bacheliers généraux sont des bacheliers de cette série. Ses programmes de formation sont bien équilibrés. Presque tous les bacheliers de la série économique et sociale poursuivent des études au-delà du baccalauréat, et la grande majorité d'entre eux obtient un diplôme à leur issue.

### Références


1 • D. Bloch, *Reflets de la physique* **17** (2009) 22-24.

2 • « L'état de l'École », Ministère de l'Éducation nationale, **16** (2006).

3 • Voir www.oecd.org

4 • D. Bloch, *Pour une stratégie convergente du système éducatif et des entreprises*, 2e édition, La Documentation française (1988).


Cet article est largement développé dans l'ouvrage *École et démocratie - Pour remettre en route l'ascenseur économique et social*, paru en mai 2010 aux Presses Universitaires de Grenoble (www.pug.fr).

© tomfry

> « La réduction du nombre de spécialités s'impose, pour autant que l'on considère comme essentiel d'accroître les chances de réussite des élèves dans les enseignements supérieurs. »

La stricte séparation entre d'un côté le baccalauréat littéraire – largement conçu, au 19e siècle, comme le couronnement des études et comme un certificat d'aptitude à briller dans les salons et à occuper des fonctions de dirigeant – et de l'autre côté un baccalauréat économique et social créé plus tard pour des élèves supposés incapables d'obtenir un baccalauréat scientifique ou un baccalauréat littéraire, est aujourd'hui dépassée. Le temps devrait être venu de les rassembler dans une « grande » série unique déclinée en un nombre limité de spécialités, offrant une alternative crédible à la série scientifique.

Le *baccalauréat technologique* paie lourdement, quant à lui, son incapacité à conduire la moitié des élèves de terminale à un diplôme de l'enseignement supérieur court, sans même évoquer la très faible proportion d'entre eux accédant à un diplôme de l'enseignement supérieur long. Il n'existe guère d'autre solution, pour enrayer son déclin vis-à-vis du baccalauréat professionnel et de la série économique et sociale du baccalauréat général, que celle consistant à accentuer le caractère généraliste des enseignements afin d'accroître les chances de réussite ultérieure des bacheliers. Le baccalauréat technologique a eu, dans une phase initiale, le grand mérite de contribuer à mettre en marche, au sein du système éducatif, l'ascenseur social. Mais si, aujourd'hui, cet ascenseur social est bloqué à l'étage, la trop stricte séparation entre la voie générale et la voie technologique en est largement responsable.

## Augmenter ou diminuer le nombre de spécialités ?

Si le baccalauréat général se décline en trois séries – scientifique, littéraire, et économique et sociale – et le baccalauréat technologique en sept, chacune de ces séries se décline en spécialités ; il y en a, par exemple, quatre pour la série scientifique : mathématiques, physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre, et technologie industrielle. Malheureusement, cette spécialisation conduit de fait à la constitution de classes de niveau et à des parcours largement différenciés dans l'enseignement supérieur [1].

De notre point de vue, *la réduction du nombre de spécialités s'impose*, pour autant que l'on considère comme essentiel d'accroître les chances de réussite des élèves dans les enseignements supérieurs. La série scientifique serait plus utile encore pour les lycéens – et pour la République – si les spécialités qui la constituent étaient réduites en nombre, voire même supprimées. Le baccalauréat littéraire souffre, plus encore que le baccalauréat scientifique, de l'extrême diversité des spécialités et options qu'il propose. Nombre des enseignements qu'elles incluent pourraient avantageusement être remis à plus tard, alors qu'ils limitent de fait aujourd'hui les possibilités d'études ultérieures. Les lycéens n'en sont pas dupes. Il en est de même pour le baccalauréat technologique, dont le nombre trop élevé de spécialités, puis d'options, ne facilite pas non plus la compréhension de ce qu'il propose ou la continuité des parcours des lycéens, une fois le baccalauréat acquis. La réduction du nombre de spécialités constitue un objectif raisonnable, mais seulement si les évolutions proposées permettent effectivement d'éviter les échecs dans l'enseignement supérieur.

De plus, de façon très générale, les évaluations conduites par l'OCDE dans le cadre du programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) établissent que les pays les plus « performants » sont – au moins jusqu'en classe de seconde, âge auquel est effectuée cette évaluation – ceux où les différenciations de toutes natures entre les élèves sont les plus réduites [3]. Le niveau moyen des élèves décroît dès lors que s'instaurent des classes de niveau. Autrement dit, l'organisation en niveaux, pour autant qu'elle profite aux meilleurs élèves, dessert bien davantage ceux qui sont les moins bons. Elle conduit, comme c'est le cas dans notre pays, à une très forte proportion d'élèves en difficulté et à une élite trop clairsemée.

Un ministre de l'Éducation nationale – il s'agit de Jean-Pierre Chevènement – a écrit : « Notre système éducatif évolue davantage en fonction de pressions internes que de sollicitations externes. Il suit une logique institutionnelle, qui veut qu'après plusieurs décennies d'existence, une institution cherche davantage à se reproduire qu'à servir le public ou la cause pour lesquels elle avait été initialement conçue » [4].

L'analyse du modèle d'élaboration du projet du « Nouveau lycée » permet-elle d'affirmer que ce projet échappe à cette critique ? Si les enseignants des lycées ont été « consultés » sur le projet de « Nouveau lycée », ne fallait-il pas ouvrir davantage le champ de la concertation ? Et notamment en direction de l'enseignement supérieur ?

**Daniel Bloch** (blochdaniel@neuf.fr)
Ancien directeur des enseignements supérieurs

# Existe-t-il des métaux à deux dimensions ?

**Geneviève Fleury**[1] (Genevieve.Fleury@unige.ch) **et Xavier Waintal** (xavier.waintal@cea.fr)
Service de physique de l'état condensé, DSM/IRAMIS, CEA/Salay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
(1) Lauréate du prix de l'exposé de thèse au Congrès général 2009 de la SFP.

Les propriétés de conduction des systèmes bidimensionnels d'électrons que l'on trouve par exemple dans les transistors de nos ordinateurs, font depuis plus de quinze ans l'objet d'un débat qui divise les physiciens de la matière condensée. Alors que l'on pensait qu'en dimension deux il ne pouvait exister que des isolants à cause du désordre inévitable dans les échantillons, des expériences, menées depuis 1994 dans des transistors de nouvelle génération, ont montré d'étranges comportements métalliques.

Par une approche numérique, nous montrons que les interactions coulombiennes entre électrons, considérables dans ces nouveaux échantillons, sont à l'origine de ces observations expérimentales.

* « Il faut s'abaisser à effectuer des simulations numériques pour résoudre même les plus simples des questions concernant [la localisation]. »

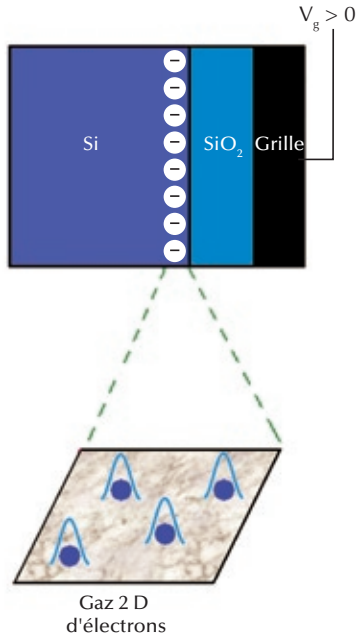
## Les concepts de métal et d'isolant

En physique de la matière condensée, les matériaux sont classés en deux catégories, selon leurs propriétés de conduction électrique : les métaux et les isolants. Dans les métaux, comme le cuivre ou l'or, des électrons peuvent conduire le courant à température nulle, si l'on applique au matériau un champ électrique. En revanche, en l'absence d'excitations thermiques, aucun courant ne peut traverser un isolant (diamant, PVC…). Ainsi, les métaux se distinguent des isolants par le fait qu'à la limite théorique de température nulle, leur résistivité électrique est finie (par opposition à infinie). Attention toutefois : cette définition théorique peut parfois paraître contradictoire avec l'idée commune que l'on se fait d'un métal. En effet, certains isolants au sens strict conduisent très bien le courant aux températures usuelles (de sorte qu'on les considère comme des métaux pour toute considération pratique) ; mais, à très basse température, ils s'arrêtent brusquement de conduire. Une raison à ce phénomène, d'origine quantique, est la présence de désordre dans le matériau, bloquant le passage des ondes électroniques (voir encadré, p. 9). C'est à celle-ci que nous allons nous intéresser dans la suite de cet article.

Avant d'aller plus loin, précisons que pour sonder en pratique le caractère métallique ou isolant d'un matériau, on mesure la dépendance en température de sa résistivité. Si celle-ci augmente lorsque la température diminue, on dit que le matériau présente un comportement isolant, puisque l'on peut alors s'attendre à une résistivité infinie à température nulle (les semi-conducteurs classiques, comme le silicium, rentrent dans cette catégorie). À l'inverse, si la résistivité diminue au cours du refroidissement on parle de comportement métallique.

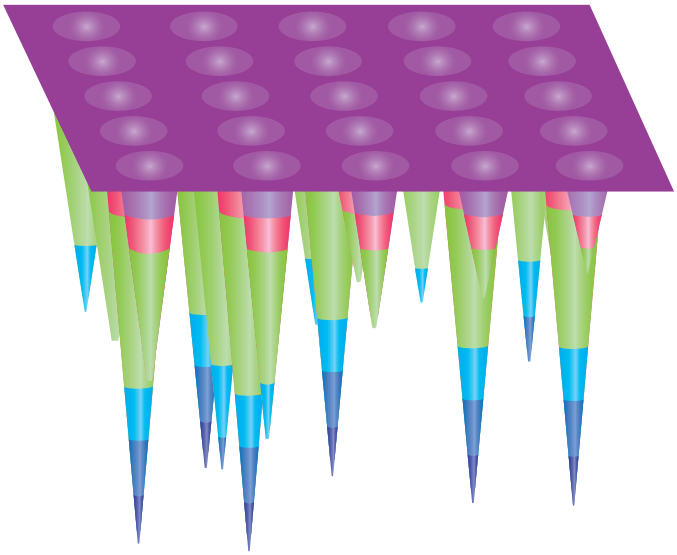
## Dans un espace bidimensionnel

La question posée dans cet article concerne le cas particulier de la dimension deux : *est-ce que des électrons confinés dans un plan peuvent conduire le courant à température nulle en présence de désordre ?* La question n'est pas seulement théorique car, depuis plusieurs décennies, les physiciens de la matière condensée sont capables de fabriquer de tels systèmes. On peut citer, par exemple, les transistors Si-MOSFETs (Silicium metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), composants de base des microprocesseurs de nos ordinateurs (fig. 1), ou encore les




**1. Schéma de principe d'un Si-MOSFET.** Les électrons du silicium (Si) sont attirés vers la « droite » par l'application d'une tension positive $V_g$ sur la grille métallique, mais se retrouvent bloqués par l'oxyde de silicium ($SiO_2$) isolant. À l'interface $Si/SiO_2$ se forme ainsi un système bidimensionnel d'électrons, localisés (fonction d'onde en bleu clair) par la présence inévitable d'un potentiel désordonné. Leur densité peut être modifiée en variant la tension sur la grille.

> “One has to resort to the indignity of numerical simulations to settle even the simplest questions about [localization].*”
>
> **Philip Warren Anderson**, prix Nobel de physique 1977.



Réseau cristallin bidimensionnel avec une distribution désordonnée de puits de potentiel sur chaque site (inspiré de A. Lagendijk *et al.*, *Physics Today* **62**, n°8 (2009) 24).

hétérostructures semi-conductrices que l'on retrouve dans nos téléphones portables. Dans ces dispositifs, l'idée est de piéger les électrons dans un puits de potentiel de très faible épaisseur à l'interface entre deux semi-conducteurs (ou entre un semi-conducteur et un isolant), de sorte que le mouvement des électrons devienne strictement bidimensionnel dans le plan de l'interface. En pratique, des impuretés et des défauts répartis aléatoirement dans le matériau sont à l'origine d'un potentiel désordonné dans lequel évoluent les électrons, couplés entre eux par l'interaction coulombienne.

## Dogme des années 1980 : pas de métal à 2D

Depuis les travaux de P. Anderson [1], il est connu que le désordre peut conduire à la localisation des électrons et ainsi inhiber la conduction électrique du système (voir encadré). Plus précisément, la théorie d'échelle de la localisation[(1)], élaborée en 1979, prédit qu'à deux dimensions un désordre infinitésimal est suffisant pour localiser les électrons, du moins tant que l'on néglige leurs interactions coulombiennes [2]. C'est ainsi que la communauté s'est convaincue qu'un système bidimensionnel d'électrons indépendants (*i.e.* sans interaction) doit nécessairement être isolant. Dans certaines limites extrêmes, les interactions ont pu être prises en compte et, à chaque fois, il s'avérait qu'elles n'aidaient pas au transport, bien au contraire [2]. À la fin des années 80, fort de ces arguments théoriques, il était ainsi admis qu'il ne pouvait exister d'état métallique à deux dimensions. Les expériences de l'époque semblaient en outre confirmer ce paradigme puisque seuls des comportements isolants, montrant une divergence de la résistivité à basse température, étaient observés.

## Révolution de 1994 : observation de comportements métalliques à 2D

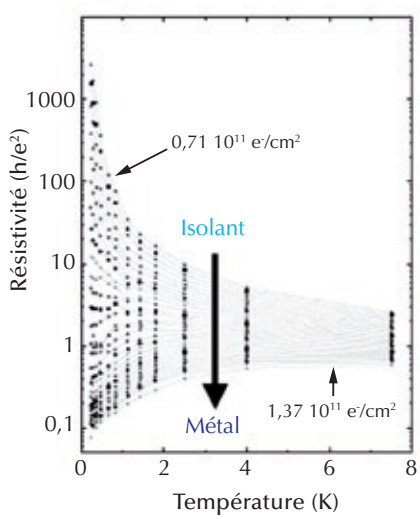
Le débat sur la question de l'existence de métaux à deux dimensions a été relancé en 1994 par des expériences réalisées par S. V. Kravchenko et ses collaborateurs, dans des Si-MOSFETs de nouvelle génération [3]. En effet, contre toute attente, des comportements métalliques ont été observés dans ces nouveaux échantillons (fig. 2) : au lieu de diverger lorsque la température est diminuée, la résistivité du système chute d'un ordre de grandeur sur une plage de température allant de quelques kelvins à quelques dizaines de millikelvins, laissant ainsi présager une résistivité finie à température nulle (*i.e.* un état métallique). À l'annonce de ce résultat, apparemment incompatible avec les arguments physiques diffusés depuis plusieurs décennies, la communauté est d'abord restée sceptique. Puis, après confirmation par différentes équipes, l'incrédulité fit place à la polémique : en quelques années, des centaines de publications parurent sur le sujet, les opinions s'affrontèrent lors de multiples conférences, et des modèles théoriques, plus ou moins saugrenus, affluèrent de toutes parts [4]. Quinze ans après, aucun consensus n'a encore été trouvé quant à l'origine de ces comportements métalliques et leur persistance ou non à plus basse température.

De la littérature expérimentale se dégagent toutefois plusieurs observations majeures.

Premièrement, les comportements métalliques ont tous été constatés à basse densité électronique (~ $10^{11}$ électrons/cm$^2$), dans un régime où les interactions coulombiennes sont trop importantes pour être négligées (voir encadré). En effet, le paramètre $r_s$ caractérisant l'importance des interactions dans le système, a pu atteindre dans les nouveaux échantillons « métalliques » des valeurs de l'ordre de 10 (voire beaucoup plus), alors que dans les expériences similaires des années 80, où la densité d'électrons était typiquement dix fois plus élevée, il ne dépassait pas 3 ou 4. Il se pourrait donc bien que la clé du mystère des comportements métalliques réside dans les interactions électron-électron et leur effet sur la localisation d'Anderson.

Une autre observation est le rôle essentiel du degré de liberté interne de *spin* (*up* ou *down*) des électrons. Il a en effet été montré que si l'on polarise tous les électrons, en

›››




**2. Données expérimentales de résistivité d'un système bidimensionnel d'électrons formé dans un Si-MOSFET** (en unité du quantum de résistance h/e$^2$) en fonction de la température (en kelvin), pour différentes densités électroniques allant de 0,71 à 1,37 (x $10^{11}$ électrons/cm$^2$) [9]. En augmentant la densité (flèche), on passe d'un comportement isolant (en haut) à un comportement métallique (en bas).

>>>

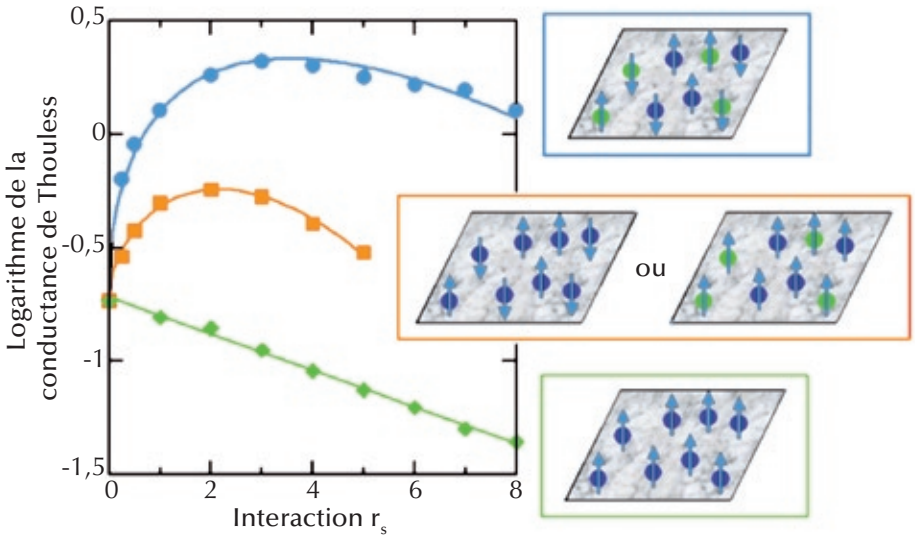
appliquant un champ magnétique Zeeman de sorte qu'ils soient tous *up*, par exemple, les comportements métalliques sont supprimés et l'on retrouve un comportement isolant.

Enfin, le degré de liberté interne de « vallée » des électrons joue aussi un rôle. Il correspond à la possibilité pour chaque électron d'occuper plusieurs puits de potentiel de même énergie, centrés autour de vecteurs d'onde différents. Pour simplifier, on pourra voir ce degré de liberté de vallée comme une couleur (disons *bleu* ou *vert*) associée à chaque électron. Dans les Si-MOSFETs où il y a autant d'électrons *bleus* que *verts*, les comportements métalliques sont beaucoup plus importants que dans les hétérostructures GaAs/AlGaAs où tous les électrons sont de la même couleur.

## Une approche numérique lourde, mais efficace

L'analyse des données expérimentales montre que la compréhension des comportements métalliques passe par l'étude du régime quantique où désordre et interactions sont tous deux importants. Or ce régime résiste à toute approche analytique. Nous avons ainsi mis au point une méthode numérique pour l'explorer [5]. Partant d'un modèle simple, mais réaliste, contenant comme ingrédients le désordre, les interactions coulombiennes, le *spin* électronique et le degré de liberté de vallée, on calcule à température nulle l'état fondamental du système bidimensionnel d'électrons, à l'aide d'une méthode stochastique, dite Monte Carlo Quantique[2]. Le degré de localisation du système est ensuite « mesuré » *via* la conductance de Thouless[3]. Cette conductance n'est pas directement celle mesurée dans les expériences décrites ci-dessus ; mais elle est sensible aux propriétés de localisation du système électronique et, en outre, elle présente l'énorme avantage d'être facilement calculable par notre méthode numérique. La dernière étape consiste enfin à rechercher la loi d'échelle reliant nos données de conductance à la taille du système, de façon à extraire la limite thermodynamique (affranchie des effets de taille finie).

En pratique, pour effectuer ces simulations numériques complexes, nous avons bénéficié des supercalculateurs du CCRT (logés au CEA/Bruyères-le-Châtel), permettant de calculer sur plusieurs centaines de processeurs en parallèle. Au total, près d'un million d'heures de calcul ont ainsi été dépensées pour mener à bien notre projet !




**3. Effet des interactions coulombiennes sur la conductance de Thouless d'un système bidimensionnel d'électrons désordonné** (de désordre et taille fixés), d'après nos données numériques. Selon la polarisation en *spin* (*up* ou *down*) et en vallée (*bleue* ou *verte*) des électrons, les interactions sont soit favorables (carrés rouges et cercles bleus), soit défavorables (losanges verts) au transport.

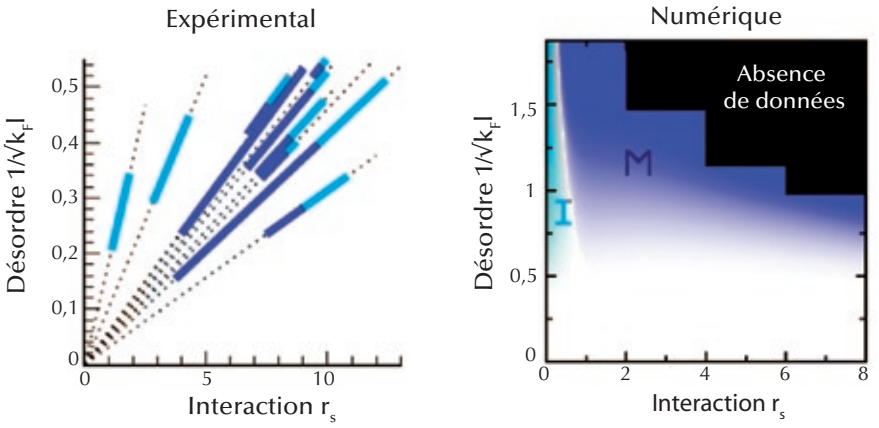
## Localisation d'Anderson et interactions électroniques

Nos résultats, illustrés par la figure 3, montrent que l'effet des interactions coulombiennes sur la localisation d'Anderson dépend fortement du *spin* des électrons et du nombre de vallées qu'ils occupent [6], comme le suggèrent les expériences discutées plus haut. Lorsque tous les électrons sont polarisés en *spin* et en vallée (tous *up* et *bleus* par exemple), les interactions font décroître la conductance de Thouless du système (diamants verts) et sont donc nuisibles au transport. À l'inverse, si l'on ajoute un degré de liberté interne, la conductance de Thouless se met à croître lorsque les interactions sont branchées (carrés rouges) et si l'on en ajoute encore un, l'augmentation de conductance est encore plus marquée (cercles bleus). Les interactions aident alors grandement au transport électronique.

Dans une vision effective à un corps (Hartree-Fock), ces résultats peuvent qualitativement s'expliquer par une compétition entre deux effets opposés des interactions. Le premier effet, assez intuitif, facilite la conduction électronique en écrantant le désordre : les électrons, placés de préférence aux puits du potentiel désordonné, induisent un potentiel coulombien moyen qui « bouche » les puits, si bien que le potentiel désordonné effectif s'en retrouve lissé. L'effet est d'autant plus efficace que les électrons ont un nombre élevé de degrés de liberté internes car, en vertu du principe de Pauli, ils peuvent alors peupler en plus grand nombre les puits de potentiel. Le second effet, à l'inverse, renforce la localisation des électrons et cela, indépendamment du nombre de degrés de liberté internes électroniques. Son origine, plus complexe, est liée à la nécessité d'antisymétriser la fonction d'onde des électrons. Lorsque tous ceux-ci sont polarisés en *spin* et en vallée, ce second terme l'emporte sur le premier (diamants verts), mais lorsque l'on ajoute un degré de liberté interne, la situation s'inverse (carrés rouges puis cercles bleus).

## Origine des comportements métalliques expérimentaux

À partir de notre modèle très simple et de notre méthode numérique, nous avons finalement réussi à proposer un mécanisme qui rend bien compte des comportements métalliques expérimentaux. Son énoncé précis, explicité et justifié ailleurs [8], dépasse le cadre de cet article ; mais l'idée sous-jacente est déjà essentiellement suggérée par l'effet drastique de délocalisation par les interactions, que nous avons observé numériquement dans les systèmes bidimensionnels d'électrons non polarisés en *spin*




**4. Comparaison des diagrammes de phase désordre/interaction obtenus expérimentalement (à gauche) et numériquement (à droite), pour le système bidimensionnel d'électrons formé dans un Si-MOSFET.** Les unités des axes des ordonnées et des abscisses sont respectivement les paramètres sans dimension de désordre $(k_F\, l)^{-1/2}$ et d'interaction $r_s$ ($r_s$ défini dans le texte, $k_F$ vecteur d'onde des électrons au niveau de Fermi et l libre parcours moyen d'un électron entre deux chocs élastiques, qui diminue quand le désordre augmente). Les régions en bleu clair (où se situent les expériences des années 80) correspondent à une phase isolante et les régions en bleu foncé (où se situent les expériences de Kravchenko 1994) à un métal apparent. Dans le diagramme expérimental, à chaque échantillon de la littérature correspond une droite, sur laquelle on se déplace en variant la densité d'électrons (en modifiant la tension de grille). Les paramètres d'interaction et de désordre diminuent quand on augmente la densité électronique. Le caractère métallique ou isolant est donné par la dépendance en température de la résistivité du système.

## Désordre *versus* interactions dans l'affaire du transport d'électrons

Tant que les électrons peuvent être vus comme de petites billes, la résistivité électrique d'un métal s'explique correctement par la présence d'impuretés (et, à température finie, de vibrations atomiques) déviant les électrons de leur course à travers le réseau d'atomes : plus les électrons sont « ballottés », plus la résistivité est élevée, mais ils finissent toujours par passer.

À très basse température, cette vision simpliste n'est plus valable, car les électrons se comportent alors aussi comme des ondes. Réfléchies par le potentiel de désordre dû aux impuretés, ces ondes peuvent interférer de manière destructrice de sorte que, finalement, les électrons se retrouvent localisés dans une région finie de l'espace. L'effet est particulièrement fort à une et deux dimensions où un petit désordre, même infinitésimal, est suffisant à la localisation (alors qu'en dimension trois, un désordre plus élevé est nécessaire). Ce phénomène quantique, connu sous le nom de localisation d'Anderson [1], explique comment le désordre peut empêcher la propagation du courant dans un matériau, en bloquant littéralement les électrons. On doit sa découverte à Philip Anderson, qui le suggéra en 1958 et obtint pour cela le prix Nobel en 1977.
Mais l'histoire ne s'arrête pas là ! En effet, les interactions coulombiennes, qui repoussent les électrons (chargés négativement) les uns des autres, peuvent venir perturber l'action du désordre en brouillant la cohérence de phase des ondes, absolument nécessaire aux interférences dans le processus de localisation d'Anderson. Désordre et interaction sont ainsi intimement mêlés lorsqu'il s'agit de discuter du transport électronique à basse température. En pratique, l'importance des interactions dans le système – caractérisée par le paramètre $r_s$, rapport de l'énergie potentielle de Coulomb sur l'énergie cinétique des électrons – peut être modifiée expérimentalement en variant la densité électronique. Lorsque celle-ci est diminuée, le paramètre $r_s$ augmente (car si l'énergie coulombienne diminue, l'énergie cinétique diminue encore plus vite). Ce faisant, c'est aussi le désordre effectif vu par les électrons qui est modifié, même si la quantité d'impuretés dans le matériau est fixée au moment de son élaboration.

et en vallée (cercles bleus de la figure 3). Sur la figure 4, nous comparons pour les Si-MOSFETs le diagramme de phase désordre/interaction prédit numériquement d'après ce mécanisme, à celui obtenu expérimentalement. Manifestement, l'accord entre ces deux diagrammes est plus que bon, d'autant qu'il a été obtenu sans paramètre ajustable. En particulier, nous prédisons des comportements métalliques au centre du diagramme, à désordre et interaction intermédiaires, exactement là où des comportements métalliques ont été observés expérimentalement. À faible interaction, nous trouvons, à l'inverse, des comportements isolants, en accord avec les expériences. La région isolante, à fort désordre et forte interaction, échappe en revanche à notre description, en l'absence de données de calcul dans ce régime extrême.

## Le comportement à 0 K

Les résultats présentés ci-dessus ne permettent toutefois pas de conclure à la stabilisation d'un vrai métal par les interactions, au sens strict de température nulle. En effet, pour traiter proprement le problème théorique de température nulle, il est nécessaire d'extrapoler nos résultats à la limite thermodynamique, c'est-à-dire à un système de taille infinie[4]. Or, une analyse poussée de nos données en théorie d'échelle montre que la conductance de Thouless du système décroît inévitablement lorsque celui-ci est agrandi, que l'on prenne en compte ou non les interactions entre électrons. *Ainsi, même si la conductance du système est augmentée par les interactions, elle finit toujours par s'annuler à la limite thermodynamique, si bien qu'à température nulle le système reste en fait rigoureusement isolant.*

Soulignons-le, cette conclusion selon laquelle il ne peut exister de métal en dimension deux n'est pas contradictoire avec les expériences où des comportements métalliques ont été observés. En effet, dans ces expériences, ce n'est pas la limite théorique de température nulle qui est explorée, mais une physique de beaucoup plus haute énergie, qui implique les états excités du système [7].

On comprend alors que l'effet de délocalisation par les interactions puisse suffire à l'observation d'un métal apparent à ces température expérimentales « élevées », bien qu'il soit insuffisant pour stabiliser un vrai métal à 0 K.

›››

## Bibliographie

1 • A. Lagendijk *et al.*, "Fifty years of Anderson localization", *Physics Today* **62** (2009) 24.

2 • P. A. Lee et T. V. Ramakrishnan, "Disordered electronic systems", *Rev. Mod. Phys.* **57** (1985) 287.

3 • S. V. Kravchenko *et al.*, *Phys. Rev. B* **50** (1994) 8039.

4 • E. Abrahams *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **73** (2001) 251.

5 • G. Fleury et X. Waintal, "A numerical finite size scaling approach to many-body localization", *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 076602.

6 • G. Fleury et X. Waintal, "Many-body localization study in low-density electron gases: Do metals exist in two dimensions?" *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 226803.

7 • G. Brunthaler *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 096802.

8 • G. Fleury et X. Waintal, "Energy scale behind the metallic behaviors in low-density Si-MOSFETs". *Phys. Rev. B* **81** (2010) 165117.

9 • S. V. Kravchenko *et al.*, *Phys. Rev. B* **51** (1995) 7038.


## ››› Conclusion

À la question de l'existence de métaux à deux dimensions, nous apportons finalement une réponse nuancée. Nous affirmons qu'il ne peut exister d'état métallique en dimension deux au sens théorique de température nulle, en accord avec le paradigme d'Anderson ; ceci signifie que si l'on était capable d'abaisser davantage la température dans les expériences, la résistivité devrait finalement diverger. Toutefois, nous attribuons les comportements métalliques observés expérimentalement à température finie, non pas à un artefact expérimental ou à un ingrédient *ad hoc*, mais à un effet intrinsèque des interactions électron-électron. En délocalisant la fonction d'onde électronique, ces interactions favorisent le transport d'électrons, sans pour autant stabiliser une vraie phase métallique. ▮

(1) L'idée de cette théorie d'échelle est d'étudier la conductance du système lorsque l'on varie la taille de celui-ci. Il est ainsi possible de déduire les propriétés de conduction du système de taille infinie.

(2) Cette méthode permet de résoudre l'équation de Schrödinger à température nulle dans l'espace bidimensionnel (discrétisé et de taille finie, pour les besoins du numérique). Nous avons ainsi étudié des systèmes contenant typiquement une trentaine d'électrons dans un millier de sites. Les paramètres physiques réalistes du silicium ont été utilisés comme paramètres d'entrée.

(3) Lorsque le système bidimensionnel est replié sur un tore et qu'un flux magnétique le traverse en son centre, un courant d'électrons apparaît dans le système. La conductance de Thouless est le coefficient de proportionnalité qui relie le courant au flux qui lui a donné naissance (à bas flux).

(4) Cela se comprend en remarquant que plus la température est basse dans le système, plus les ondes électroniques gardent leur capacité d'interférer entre elles sur une grande distance. C'est à cette distance que correspond la longueur de notre système dans nos simulations numériques.

*Brève*

**Extrait des communiqués de presse CNRS-INSU du 21 avril 2010 et CEA du 21 mai 2010**

# Volcan islandais : adaptation d'un laser « Lidar » pour observer les cendres volcaniques

© CEA

**Vue du Lidar installé dans l'avion de l'unité Safire.** Le hublot en silice permet de ne pas altérer la qualité du faisceau laser.

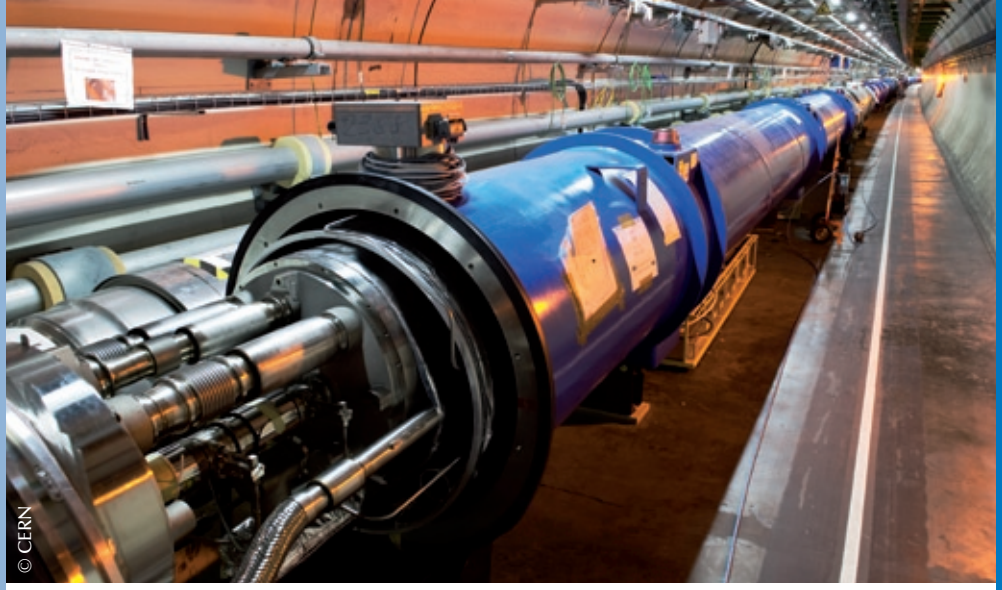
À la demande des autorités gouvernementales, les avions de recherche français exploités par l'unité mixte Safire[(a)] (CNRS-INSU, Météo-France et Cnes) effectuent depuis le 19 avril des vols scientifiques pour caractériser les cendres issues du volcan islandais Eyjafjöll. Avec l'aide de la société Leosphere[(b)], le CEA, *via* le LSCE[(c)], a pu rapidement adapter un système Lidar – *Light Detection and Ranging* – et l'embarquer sur le Falcon 20 du Safire. Cet instrument permet de localiser les couches résiduelles du panache de cendres volcaniques et d'obtenir des informations sur la taille des particules.

Le principe de mesure repose sur l'émission d'un faisceau laser vers la zone à étudier, puis l'analyse de la partie du signal rétrodiffusée vers l'instrument par les particules présentes dans l'atmosphère [1]. Les quantités de photons « réfléchis » et leur temps de retour permettent de déterminer la présence de particules et leur altitude. Les mesures sont réalisées dans l'ultraviolet, à une longueur d'onde de 355 nm.

Les mesures effectuées le 20 avril 2010 ont permis de localiser, jusqu'à 8 000 mètres d'altitude, les couches résiduelles du panache de cendres volcaniques d'Eyjafjöll dans certaines parties de l'espace aérien français. Le Lidar ne permet pas, seul, de déterminer la nature chimique des cendres et leur concentration. Il faut pour cela disposer de mesures chimiques et granulométriques complémentaires réalisées par prélèvements *in situ* par un autre avion, l'ATR 42 de Météo-France. Des vols coordonnés des deux avions ont été organisés le 11 mai 2010.


[1] G. Méjean *et al.*, *Reflets de la physique* **n°1** (septembre 2006), pp. 10-13.


(a) Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement (www.safire.fr). (b) Leosphere France, Orsay (www.leosphere.com). (c) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette (www.lsce.ipsl.fr).




Vue du tunnel du LHC en août 2007.

# Le calcul scientifique des expériences LHC

## Une grille de production mondiale

**Fairouz Malek** (Fairouz.Malek@in2p3.fr)
Responsable scientifique du projet LCG-France, membre de l'expérience ATLAS du LHC
LPSC, CNRS-IN2P3 et Université Joseph Fourier, 53 Av. des Martyrs, 38 000 Grenoble

Le LHC, c'est avant tout l'accélérateur de particules le plus puissant au monde ; il a nécessité des travaux d'infrastructure titanesques. C'est également une aventure humaine et une entreprise intellectuelle toutes deux uniques dans l'histoire des sciences.

L'analyse de l'énorme quantité de données enregistrées par ses expériences exploitera une infrastructure mondiale inédite, la « Grille de Calcul », comparable en puissance de calcul à l'infrastructure de « Google », mais autrement plus performante pour le traitement, le transfert et le stockage des données.

Cette infrastructure de calcul a donné naissance à une grille de production mondiale, qui a attiré d'autres disciplines scientifiques.

Le LHC, acronyme anglais pour Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider), est le plus puissant accélérateur de particules subatomiques au monde. Les particules accélérées à une vitesse proche de celle de la lumière, y circulent dans un anneau de 27 km de circonférence, enterré à 100 m sous terre et situé à cheval sur la frontière franco-suisse près de Genève.

Mis en œuvre par le laboratoire européen du CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), le LHC et les équipements expérimentaux associés ont été conçus et construits par une collaboration internationale. Il a démarré en septembre 2008 mais, le 19 du même mois, de graves incidents techniques ont nécessité un arrêt qui a duré plus d'un an. Il fonctionne de nouveau depuis le 20 novembre 2009 et a livré plus de 100 millions de collisions à des énergies atteignant 7 TeV (téra[a] eV) dans le centre de masse, la moitié de l'énergie nominale, attendue dans deux ans.

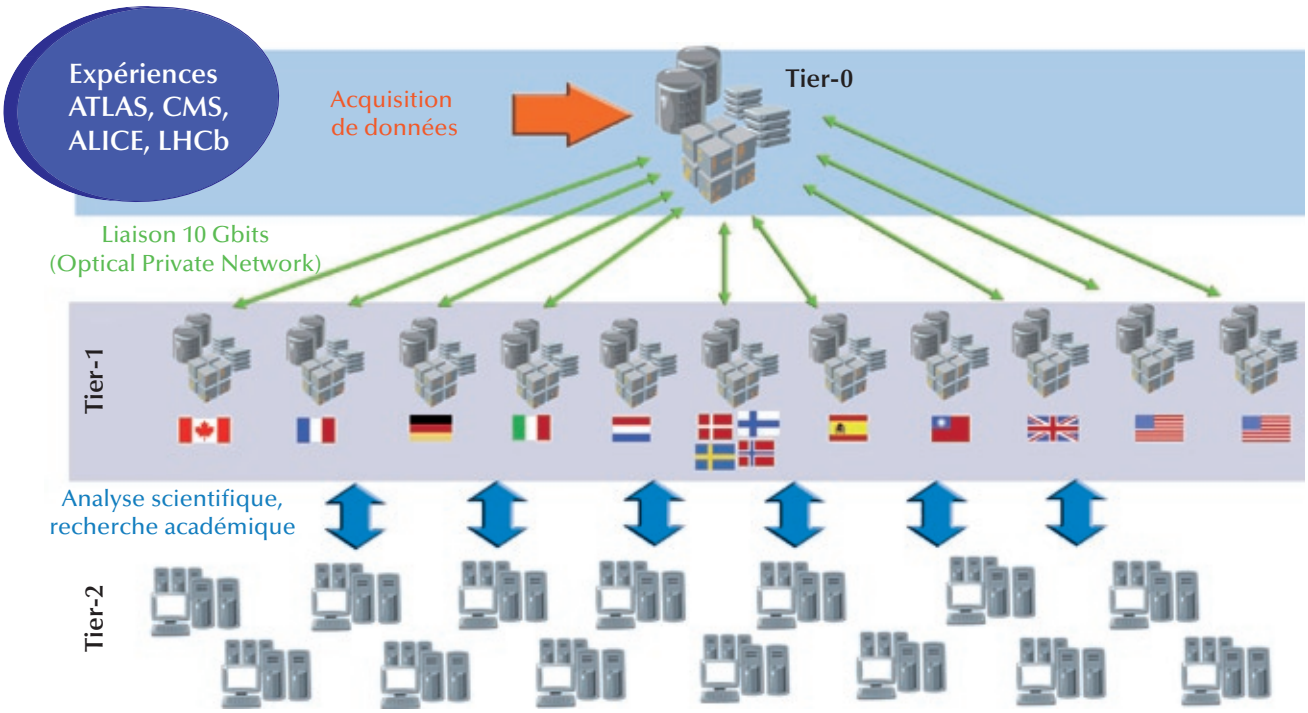
Quatre gigantesques expériences, ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid) et LHCb (où le « b » signale que l'expérience est dédiée à la physique du quark *b*), observeront les collisions entre les particules accélérées pour tenter de percer quelques-uns des mystères fondamentaux de l'origine de l'Univers. Plus de 8000 scientifiques du monde entier sont associés à cette aventure humaine hors du commun.

L'article de B. Mansoulié dans *Reflets* n°14, pp. 5-9, décrit en détail l'accélérateur, les expériences, la démarche et les objectifs scientifiques attendus. Cet article-ci vous fera découvrir les moyens et les innovations technologiques mis en œuvre pour le calcul scientifique, qui permettront aux physiciens des quatre expériences d'analyser les données du LHC.

### Le traitement des données

Lorsque le LHC fonctionnera en régime de croisière, 40 millions de particules accélérées entreront en collision chaque seconde, et des milliers de particules secondaires seront générées et traverseront les détecteurs des expériences. *In fine*, le passage d'une particule dans un détecteur se traduit par des impulsions électroniques à partir desquelles les physiciens peuvent déterminer sa trajectoire et son identité. Les millions d'impulsions créées par chaque collision sont alors numérisées par des circuits électroniques intégrés aux détecteurs avant d'être transmises par fibres optiques aux ordinateurs d'acquisition de données. Les données numériques y sont regroupées sous formes de fichiers binaires de

›››




© CERN

1. Architecture du calcul des expériences LHC.

## Définitions

**(a) Giga** = $10^9$ ; **Téra** = $10^{12}$ ; **Péta** = $10^{15}$.

**(b) Octet :** une unité de mesure de quantité de données. Un octet est lui-même composé de 8 bits, soit 8 chiffres binaires. 1 Moctet = 1 million d'octets.

**(c) Ferme de calcul :** une grappe d'ordinateurs fournissant de la puissance de calcul pour traiter l'information.

**(d) Tier :** mot anglais voulant dire niveau ou rang. L'image la plus proche de cette définition est l'oignon que l'on épluche rang par rang.

**(e) MoU :** Memorandum of Understanding = protocole d'accord de collaboration, dont la référence est : CERN-C-RRB-2005-01.

**(f) 1 CPU** = 1 processeur (1 cœur) des ordinateurs les plus performants de nos jours.

**(g) IN2P3 :** Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, un des instituts nationaux du CNRS.

**(h) IRFU :** Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers de la DSM (Direction des Sciences de la Matière) du CEA.

›››

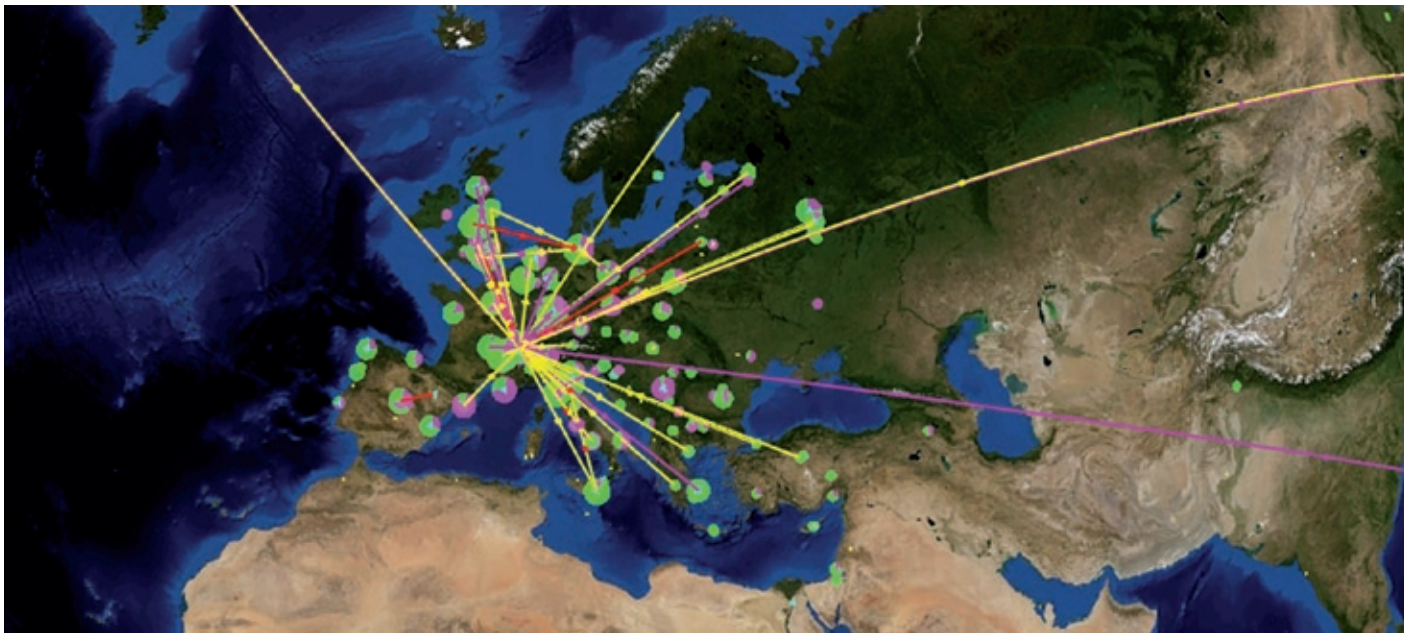
« données brutes ». Chaque collision constitue, au niveau de chacune des quatre expériences, un événement dont la taille en données brutes est de l'ordre du million d'octets[b] (1 Mo). Afin de réduire la quantité de données, un tri intelligent est réalisé en un temps ultra-court (moins d'une seconde) pour ne garder que les événements potentiellement intéressants. Ce tri réduit le taux d'acquisition dans une première étape (quelques microsecondes) à 100 000 événements par seconde, grâce au circuit électronique de déclenchement, puis, dans une deuxième étape à environ 100 ou 200 événements par seconde, cette fois-ci en traitant les informations à l'aide de ressources (fermes de calcul[c]) et d'algorithmes dédiés. Les données brutes, après tri, sont finalement enregistrées à un taux équivalent à 1,5 CD par seconde pour les quatre expériences, sachant que la capacité d'enregistrement d'un CD est de 700 Mo.

Le processus de traitement des données brutes peut alors commencer. Il s'effectue en deux étapes. La première transforme les millions d'informations enregistrées en des informations dites de « physique », contenant les caractéristiques de chaque trajectoire, l'impulsion et l'identité de chacune des particules détectées. Dans la deuxième étape, ces informations sont analysées et les résultats sont regroupés de façon à pouvoir identifier et interpréter les phénomènes physiques. Ces traitements réduisent la taille de l'information d'un facteur 2 à 10. Le processus est en général répété plusieurs fois par an sur l'ensemble des données acquises depuis le démarrage, lorsqu'elles sont produites dans des conditions similaires. Ce "(re)processing" est effectué pour tenir compte du développement continu des algorithmes de traitement et d'étalonnage du détecteur.

## La grille de calcul : l'état de l'art

Dans les conditions nominales de fonctionnement du LHC, les expériences enregistreront chaque année $10^{10}$ collisions ; ce dernier chiffre est comparable au nombre d'étoiles dans la Voie Lactée. Traiter les données ainsi accumulées représente un véritable défi informatique, autant pour les flux (de l'ordre du gigaoctet[a] par seconde) que pour leur volume (plusieurs dizaines de pétaoctets[a] chaque année). À tout instant, plusieurs milliers de chercheurs du monde entier solliciteront des ressources de calcul et de stockage pour analyser ces données. Pour faire face à ce défi, la solution du calcul distribué, ou « grille de calcul », s'est imposée. Elle a été mise en œuvre par la collaboration W-LCG (World wide LHC Computing Grid) [1].

Les supercalculateurs – dont le Blue Gene/L d'IBM – offrent des capacités de calcul de l'ordre de milliers de milliards d'opérations à la seconde, en utilisant des architectures de type « massivement paral-



Source : GridPP.

**2. Image instantanée de la grille EGEE.** Les cercles représentent les machines qui effectuent les tâches à l'instant de la prise d'écran (en vert : tâches en exécution ; en rose : tâches en attente d'exécution ; la taille du cercle représente la quantité de tâches en exécution par rapport au total mondial). Les lignes représentent les tâches transférées entre sites (en jaune : tâches faites et réussies ; en rouge : tâches avortées ; en rose : tâches en attente d'exécution).

lèles ». Ces ordinateurs utilisent les meilleures technologies disponibles au moment de leur conception. Chaque processeur permet le traitement d'une portion du problème à traiter, et l'échange des données entre les processeurs se fait à un très haut débit. L'inversion d'une matrice est le calcul type pour lequel ce genre d'ordinateur est efficace.

Les grilles informatiques, quant à elles, mettent en commun des ressources de calcul et de stockage de tous les objets reliés à la grille. Elles associent plusieurs générations de processeurs usuels diffusés à grande échelle dans le commerce comme, par exemple, les Intel Xeon et AMD opteron. Sur la grille, chaque processeur traite un seul événement. Les événements étant indépendants les uns des autres, il y a donc peu de données à transférer entre les processeurs. Le principal intérêt de ce système, fondé sur la mise en commun des ressources, réside dans ses capacités quasi infinies et dans sa capacité d'évolution en continu, à la différence des machines massivement parallèles. Il suffit, en effet, d'ajouter de nouvelles entités pour augmenter d'autant les capacités de calcul de la grille. Celles-ci peuvent égaler les supercalculateurs en puissance de calcul, bien qu'elles soient limitées par les capacités de transfert entre processeurs ; mais leur principal atout est qu'elles peuvent traiter des quantités énormes (mesurées en pétaoctets) de données réparties sur la grille.

Si nous évaluons les capacités des supercalculateurs en Tflops/sec, ce sont, pour les grilles informatiques, les pétaoctets de données stockées, échangées et distribuées qui sont la bonne mesure. Les grilles sont centrées sur l'analyse d'énormes quantités de données en s'appuyant sur de très nombreux ordinateurs, mondialement distribués. Ceci permet, dans une certaine mesure, de partager le coût proportionnellement aux ressources mises à disposition par chacun des pays contributeurs.

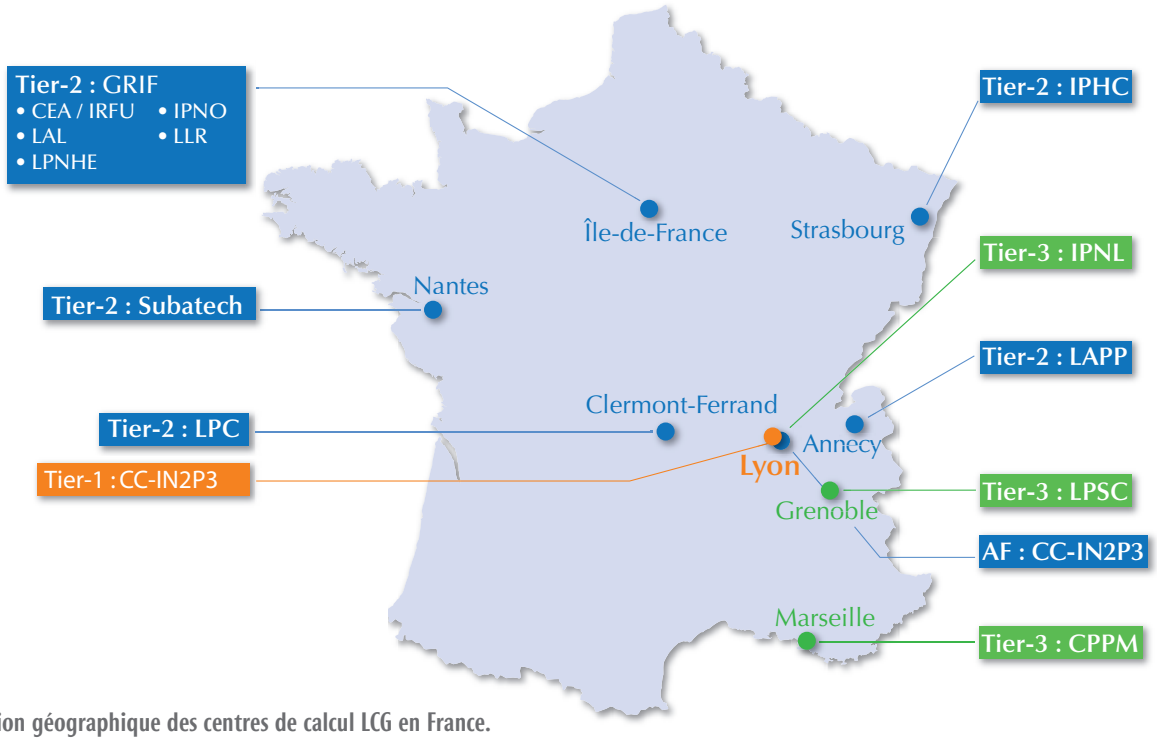
Le principe de la grille W-LCG s'appuie sur des centres de calcul répartis dans le monde entier et qui sont organisés en réseau. Elle s'articule autour de deux grilles principales, technologiquement différentes mais interopérables, l'une en Europe, EGEE [1] (Enabling Grids for E-sciencE), et l'autre aux États-Unis, OSG [1] (Open Science Grid), auxquelles sont associées des grilles régionales ou nationales. Lorsqu'une requête est formulée par un utilisateur à partir de l'un des nombreux points d'entrée du système, la grille de calcul établit l'identité de l'utilisateur, vérifie ses autorisations, recherche les sites disponibles et susceptibles de fournir les ressources requises, en termes de stockage, de capacité de calcul, de disponibilité des logiciels d'analyse… pour finalement satisfaire la requête de l'utilisateur, sans que ce dernier ait à se soucier du détail du processus.

La grille W-LCG est hiérarchisée en quatre niveaux, ou rangs, appelés « Tier »[d]. L'appartenance à un rang donné fixe la nature et la qualité des services qu'un centre de calcul doit fournir. La quantité de ressources à fournir est à la discrétion des agences de financement, selon un protocole d'accord rediscuté chaque année (MoU)[e].

Les fonctions exigées pour chacun des rangs (fig. 1) sont les suivantes :

- Tier 0 : il est unique, c'est le centre de calcul du CERN. Il est responsable de la collecte et du stockage des données brutes enregistrées par les expériences et de leur distribution vers les onze centres de rang inférieur, les Tier 1.
- Tier 1 : ce sont de grands centres nationaux ; ils sont chargés de stocker une copie des données brutes, de les traiter pour en extraire des données de physique et de distribuer ces dernières vers les centres de rang inférieur, les Tier 2.
- Tier 2 : au nombre d'environ 150, ce sont les centres des instituts ; ils sont en charge de l'analyse finale des données par les utilisateurs et de la production des simulations.
- Tier 3 : ce sont également des centres dans les instituts ; ils fournissent des ressources complémentaires aux centres Tier 2 pour un usage local, sans engagement vis-à-vis de W-LCG.

›››




3. Répartition géographique des centres de calcul LCG en France.

Des liaisons haut débit, de 10 Goctets/s ou plus, spécialement conçues pour le LHC (LHC Optical Private Network), connectent le centre Tier 0 aux centres Tier 1. Elles assurent le transit des données venant des expériences et des données de physique, traitées à un taux de 800 Moctets/s. Les centres Tier 2 sont connectés aux Tier 1 par des liaisons de l'ordre du Goctet/s.

Pour traiter l'ensemble des données enregistrées par les expériences du LHC, les besoins en capacité de calcul sont de l'ordre de 100 000 CPU[f]. Pour stocker la totalité de ces données il faudra une capacité de l'ordre de 15 pétaoctets par an, soit l'équivalent de 15 millions de CD qui, empilés, atteindraient une hauteur de 20 km.

Actuellement, la grille W-LCG compte près de 200 sites répartis sur trois continents, en Europe, Amérique et Asie. Avant le démarrage du LHC, elle était déjà opérationnelle, avec plus de 50 000 tâches traitées quotidiennement, pour la production de données simulées et le traitement de données de tests. À partir du mois de mars 2010, W-LCG a vu passer 650 000 tâches par jour ; le million sera bientôt atteint au mois de juin 2010, ce qui tend vers les 100 000 CPU par jour attendus. La figure 2 est une image instantanée du site de contrôle en ligne de la grille EGEE. On peut, entre autres, observer les échanges de données entre sites et la capacité instantanée de calcul fournie par chacun des sites.

## La contribution de la France

La France héberge au centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne dans la région lyonnaise, l'un des onze centres Tier 1 de W-LCG. Elle dispose également de plusieurs sites Tier 2 et Tier 3 (fig. 3). La gestion de ces ressources, le fonctionnement, le financement et les relations avec W-LCG sont assurés par le projet LCG-France, créé en 2004 [2].

Le CC-IN2P3, financé conjointement par l'IN2P3[g] du CNRS et l'IRFU[h] du CEA, offre ses services aux quatre expériences du LHC, à hauteur de 15% de l'effort mondial des Tier 1. Le CC-IN2P3 héberge également un Tier 2 et un Tier 3, regroupés sous l'appellation de « centre d'analyse » (AF). La contribution relative de la France à l'effort mondial des Tier 2 est voisine de 10%. Il est important de noter que les ressources françaises ne sont pas réservées exclusivement aux chercheurs français, mais qu'elles sont accessibles à l'ensemble des chercheurs participant au projet LHC selon l'accord de collaboration (MoU)[e]. Réciproquement, les chercheurs français ont accès à l'ensemble des ressources mondiales.

## Vers quel futur ?

La grille de calcul exploitée par la communauté de la physique des particules, historiquement pionnière dans cette application, a vu avec le démarrage du LHC et les études de faisabilité du successeur du LHC, le nombre de ses utilisateurs croître

## Pour en savoir plus

1 • Les sites de W-LCG, EGEE et OSG se consultent, respectivement, aux adresses suivantes :
http://lcg.web.cern.ch/lcg/
www.eu-egee.org/
www.opensciencegrid.org/

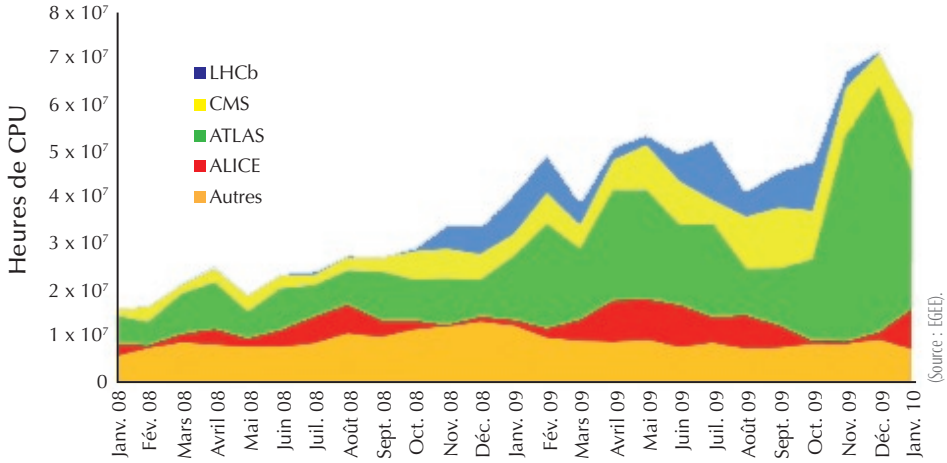
2 • Le site Web du projet LCG-France :
http://lcg.in2p3.fr/

3 • EGI : http://web.eu-egi.eu/

4 • Institut des Grilles du CNRS : www.idgrilles.fr/
Un GIS est un groupement d'intérêt scientifique ; on peut citer le grand accélérateur GANIL, dont le statut est similaire.

5 • Livre blanc sur les grilles de production :
oai :hal.in2p3.fr :in2p3-00408379_vl.

6 • Article de presse CNRS du 31 janvier 2007 :
« Malaria : plus de 4,3 millions de médicaments testés grâce aux grilles de calcul ».
www.in2p3.fr/presse/communiques/archives/2007/01_egee_wisdom.htm




**4. Évolution mensuelle, en heures de CPU, de l'utilisation de la grille de calcul EGEE** par les quatre expériences du LHC, de janvier 2008 à janvier 2010. En orange, utilisation par des expériences extérieures au LHC.

continuellement. De plus, le pouvoir attractif d'une grille de calcul bien rodée est indéniable. Les chercheurs d'autres disciplines connexes, telles que la physique nucléaire et celle des astroparticules, ne manqueront pas de vouloir utiliser ce fantastique outil. Ainsi, dès 2012, près de 85% des ressources de calcul utilisées par les disciplines regroupées au sein de l'IN2P3 le seront au travers de la grille de calcul. Celle-ci sera progressivement utilisée dans tous les domaines de la science et trouvera naturellement des retombées bien au-delà du monde de la recherche.

L'avènement de la grille de calcul comme outil de référence pour de très grandes infrastructures de recherche comme le LHC, nécessite une pérennisation tant à l'échelle mondiale ou européenne que nationale. L'effort entrepris jusque-là pour mettre sur pied une grille de calcul en France doit être vigoureusement poursuivi, avec une attention particulière pour les ressources dédiées au LHC. De cette façon, nos chercheurs pourraient relever le défi de l'analyse de ces données dans un contexte de très forte compétition internationale.

Le projet EGI (European Grid Initiative) [3] est en train de prendre le relais du projet EGEE financé par l'Europe. Il repose sur des initiatives nationales (NGI), dont le « GIS » France Grilles est le représentant français et l'Institut des Grilles du CNRS le mandataire [4]. Le besoin total pour la France est estimé à environ 25 000 cœurs et 75 pétaoctets de disque d'ici 2012 [5].

Les grilles de calcul sont devenues en quelques années un outil indispensable à la communauté nationale dans plusieurs domaines scientifiques de premier plan, tels la physique subatomique, les sciences du vivant ou les sciences de la planète. Elles apparaissent très clairement comme la ressource informatique complémentaire des grands supercalculateurs utilisées par des disciplines comme la génomique, la météorologie, la dynamique des fluides, la chromodynamique quantique sur réseau, les simulations d'accidents, etc. La figure 4 illustre la croissance des cas d'utilisation de la grille de calcul, de janvier 2008 à janvier 2010, toutes disciplines confondues. Environ 30% de cette utilisation concerne des projets autres que ceux du LHC.

Citons un cas exemplaire d'utilisation de la grille de calcul en sciences du vivant : l'expérience Wisdom *(World-wide in silico docking on malaria)* [6]. La stratégie de Wisdom repose sur un criblage virtuel de molécules aux performances thérapeutiques encourageantes : elle permet aux chercheurs de calculer la probabilité qu'une molécule active se fixe sur une protéine cible, altérant ainsi son activité biologique, et, dans le cas de la malaria, la prolifération du parasite. Wisdom s'est alors associée à plusieurs grilles de calcul internationales : la grille régionale Auvergrid en Auvergne, les grilles EELA en Amérique du Sud, EuChinagrid en Chine, EuMedgrid autour de la Mediterranée et ASGC TWGrid ont ainsi mis à disposition leurs ressources de calcul, complétant celles de la grille EGEE. Au cours des 10 semaines d'expériences, le projet Wisdom a permis d'analyser près de 80 000 médicaments potentiels par heure ; par conséquent, 4,3 millions de molécules actives (médicaments potentiels) ont été testées, et plus de 140 millions de liaisons entre ces molécules et les protéines cibles pour combattre la malaria ont été calculées. Ce programme a mobilisé simultanément plus de 5000 ordinateurs dans 27 pays, produisant plus de 2000 gigaoctets de données, ce qui représente l'équivalent de plus de 400 années de calcul sur un seul ordinateur.

En France, plusieurs laboratoires du CNRS ont apporté leur contribution de façon significative : le Centre de calcul de l'IN2P3 a géré les ressources mises à disposition pour cette initiative et le LPC-Clermont a supervisé l'utilisation des ressources pour les différents calculs scientifiques. La contribution de l'ensemble des laboratoires français sur la grille EGEE dans le cadre de Wisdom représente environ 15% des 400 années de calculs. Grâce à la grille de calcul, Wisdom a ouvert la voie à de nouvelles perspectives thérapeutiques pour le traitement du paludisme, mais également pour combattre d'autres maladies tropicales. Ce travail a débouché sur le dépôt de brevets pour des molécules actives contre le parasite de la malaria. Le même type de calcul sur d'autres cibles biologiques, pour combattre la grippe aviaire et le diabète, a été effectué avec comme résultat le dépôt de brevets pour des nouvelles molécules prometteuses. ▮

Extrait du communiqué de presse CNRS-CEA-ESRF du 21 avril 2010

# Confirmation expérimentale des théories sur la surfusion, ou pourquoi l'eau ne gèle pas dans les nuages

La surfusion est un état métastable de la matière, qui ne peut se produire qu'avec un liquide très pur et ne contenant pas de germes cristallins. Les nuages de haute altitude sont un bon exemple de ce phénomène : ils sont constitués de minuscules gouttelettes d'eau qui, en raison de la pureté de l'air, ne forment pas de glace malgré de très basses températures. Qu'un avion traverse le nuage et les gouttelettes d'eau vont s'accrocher à sa structure qui possède des impuretés, déclencher très rapidement le processus de cristallisation et former de la glace. C'est pour cette raison que certains avions sont équipés de systèmes de dégivrage.

De nombreuses questions sur le mécanisme de la surfusion restent encore sans réponse. Actuellement, les théoriciens postulent que la structure interne des liquides pourrait être incompatible avec la cristallisation : des modèles théoriques suggèrent que les atomes dans les liquides s'organisent en pentagones. Or, pour former un cristal, il faut une structure qui peut être répétée périodiquement, de façon à remplir tout l'espace, ce que la forme pentagonale ne permet pas. Pour que la cristallisation puisse avoir lieu, la structure pentagonale doit être « cassée » afin que les atomes se réarrangent.

Jusqu'à aujourd'hui, la preuve expérimentale de cette explication n'avait pas été apportée. En étudiant par rayonnement synchrotron un alliage de silicium et d'or à l'état liquide, des chercheurs du CEA[(a)], de l'ESRF[(b)] et du CNRS[(c)] ont pu prouver que l'ordre pentagonal était bien à l'origine de la surfusion. Dans le liquide en contact avec une surface de silicium sur laquelle une surstructure de symétrie 5 a été réalisée par dépôt d'atomes d'or, une surfusion très importante est observée. L'étude par diffraction de rayons X *in situ* et par dynamique moléculaire *ab initio* montre que cet arrangement pentagonal se propage latéralement dans les couches de liquide voisines de la surface, et stabilise donc l'état liquide. Au contraire, au contact d'une surface de silicium présentant une symétrie 3 ou 4, compatible avec l'état cristallin, la surfusion du liquide est très réduite.

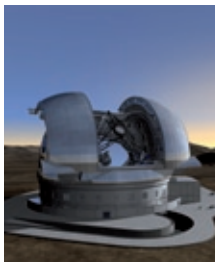
**Contact : Tobias U. Schülli** (schulli@esrf.fr)

(a) Institut Nanosiences et Cryogénie, CEA/Grenoble. (b) European Synchrotron Radiation Facility. (c) Institut Néel, Grenoble, et Laboratoire SIMaP, Saint-Martin d'Hères.

[1] "Substrate-enhanced supercooling of AuSi eutectic droplets", T.U. Schülli *et al.*, *Nature* **464** (2010) 1174.

Actualité scientifique de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS (27 avril 2010)

# Le plus grand télescope au monde sera situé au Chili



**Design actuel de l'ELT.** Le télescope de 42 m de diamètre sera protégé par un dôme de 90 m de haut et 90 m de diamètre

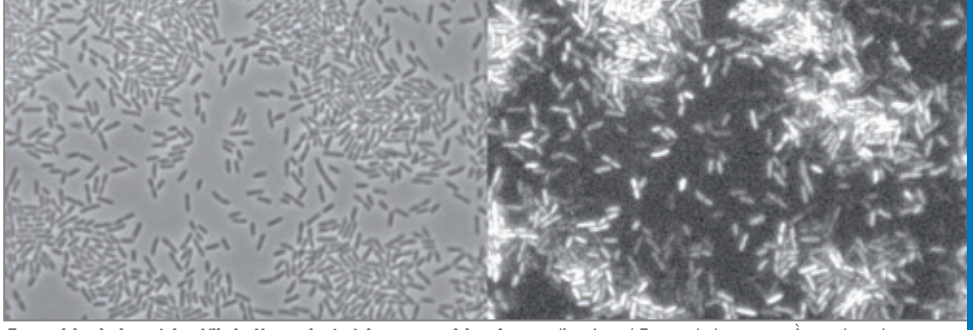
[1] D. Hulin, *Reflets de la physique* **n°16** (2009) 30-32.

Les astronomes européens ont le projet de construire un télescope de 42 m de diamètre, l'European Extremely Large Telescope (E-ELT) [1]. Ce télescope, le plus grand au monde, pourrait être opérationnel à la fin de la décennie. Il permettra, grâce à une résolution spatiale exceptionnelle – une fois corrigés les effets de la turbulence atmosphérique – et grâce à sa très grande surface collectrice, de répondre aux questions les plus brûlantes en astronomie, en particulier celles qui concernent la formation et l'évolution des galaxies et des systèmes planétaires ou la composition de notre Univers.

La conception optique, avec cinq miroirs, est révolutionnaire et assure une qualité d'image exceptionnelle. Le miroir primaire de 42 m est composé de 984 segments hexagonaux asservis de façon à ajuster la forme voulue avec une précision nanométrique. Le miroir secondaire a 6 m de diamètre et est presque aussi grand que les plus grands miroirs primaires des télescopes actuellement en service. Deux miroirs adaptatifs sont utilisés pour compenser la turbulence atmosphérique ; l'un d'eux est soutenu par 5000 actionneurs qui ont une fréquence de 1 kHz.

Une étape importante a été franchie le 26 avril 2010 avec la sélection, par le Conseil de l'Observatoire Austral Européen (ESO), du Mont Armazones comme site de référence pour l'E-ELT. Le Mont Armazones est un sommet de 3060 m situé dans la partie centrale du désert d'Atacama au Chili, à quelques 130 km au sud de la ville d'Antofagasta et à environ 20 km du Mont Paranal, sur lequel sont installés les quatre télescopes de 8 m de diamètre de l'ESO qui constituent le Very Large Telescope. Le choix du site s'est appuyé sur une qualité astronomique (transparence et stabilité de l'atmosphère…) exceptionnelle, mais aussi sur des considérations de coût et de complémentarité avec d'autres très grands observatoires situés au Chili ou dans l'hémisphère Sud.

**Contact : Jean-Marie Hameury** (jean-marie.hameury@cnrs-dir.fr)



**Ensemble de bactéries *Vibrio Harveyi* génétiquement identiques,** d'environ 1,5 µm de longueur. À gauche, photo en microscopie à contraste de phase. À droite, signal de luminescence, très variable d'une bactérie à l'autre.

# Importance et contrôle des fluctuations dans les systèmes biologiques

**Bahram Houchmandzadeh** (bahram@spectro.ujf-grenoble.fr) **et Irina Mihalcescu**
Laboratoire de spectrométrie physique, UMR 5588 CNRS-UJF, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex

Les cellules vivantes sont des « usines » chimiques miniatures. Contrairement à leurs équivalents macroscopiques et plus précisément à cause du faible nombre de molécules impliquées, les réactions qui s'y déroulent ne sont pas entièrement déterministes.

La gestion des « probabilités » fait donc partie intégrante de la vie des cellules et laisse sa trace à toutes les échelles spatiales du vivant.

Nous allons passer en revue dans cet article quelques aspects de cette gestion du « bruit stochastique », qui a profondément changé notre vision des systèmes vivants durant ces dix dernières années.

Les fluctuations et l'approche probabiliste ont joué un rôle fondamental en physique à travers la physique statistique et la mécanique quantique. En biologie cependant, mise à part la théorie de l'évolution, le concept de probabilité n'avait pas un grand rôle jusqu'à une période récente. Pour la plupart des biologistes, les cellules étaient des machines déterministes, certes très complexes mais répondant de façon unique à une stimulation donnée. Mais à partir de la fin des années 1990, il est apparu de plus en plus clairement que les fluctuations jouent un rôle majeur en biologie, et un nombre très important de travaux y ont été consacrés. La variabilité des comportements des organismes génétiquement identiques en conditions externes identiques (appelée aussi « individualité non génétique ») était reconnue par les biologistes depuis longtemps et des expériences importantes y avaient été consacrées ; mais cette variabilité n'occupe le devant de la scène que depuis récemment. On s'est rendu compte que les organismes vivants doivent consacrer une partie de leurs ressources au contrôle des fluctuations, surtout pour les fonctions où la fidélité de réponse est cruciale à la survie de l'individu [1].

Dans cet article, nous allons passer en revue quelques aspects importants de ce thème : (i) pourquoi les fluctuations existent et quels outils les scientifiques ont élaboré pour les mesurer ; (ii) comment font les cellules pour les maîtriser ou (iii) les utiliser ; (iv) quelle est leur importance à des échelles spatiales plus grandes.

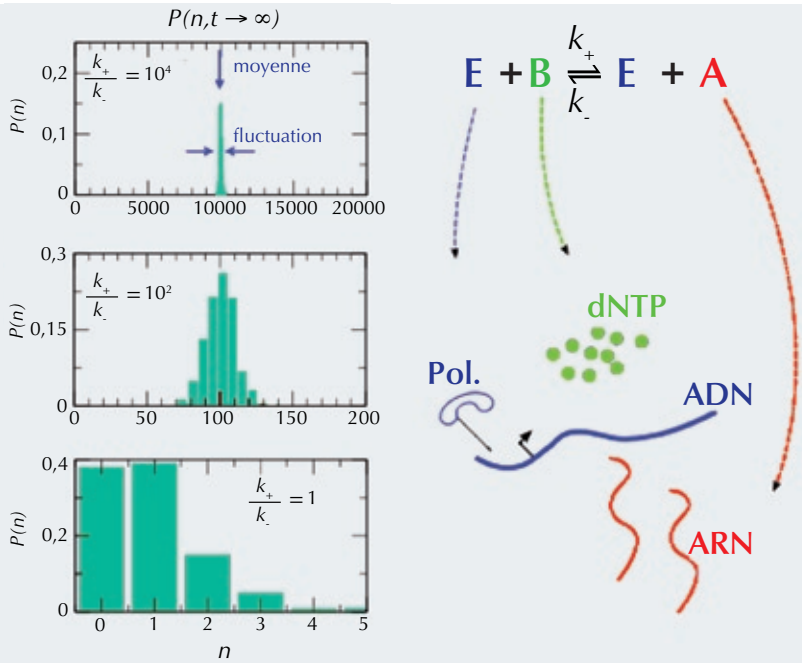
## Fluctuations dans les cellules

Une machine déterministe produit toujours le même résultat en réponse à une « entrée » donnée. Au contraire, une machine probabiliste produit des résultats différents, distribués plus ou moins largement autour d'une valeur moyenne. En pratique, nous pouvons considérer une machine probabiliste comme déterministe si la largeur de la distribution des résultats devient très faible comparée à la moyenne. Ceci est le cas en chimie macroscopique où l'information est essentiellement contenue dans la « moyenne », dont nous pouvons décrire l'évolution en utilisant les équations différentielles usuelles de la cinétique chimique.

Cependant, quand le nombre de molécules est faible, la moyenne est une quantité qui décrit mal l'observation, car les fluctuations deviennent importantes (voir encadré statistique, p. 20). Dans les bactéries, les réactions chimiques (assurées essentiellement par des protéines) impliquent souvent un très faible nombre de molécules (fig. 1). Un exemple classique est la bactérie *Escherichia coli*, dont 80% des gènes sont exprimés à moins de 100 copies de protéines par cycle cellulaire, menant à des amplitudes relatives de fluctuations $\sigma / \langle n \rangle$ de 5% à 65%. Ainsi, observant un ensemble de bactéries, nous devons nous attendre à ce que le produit d'une réaction donnée soit très variable d'une bactérie à une autre (voir l'exemple de la bactérie *Vibrio Harveyi* en figure 2).

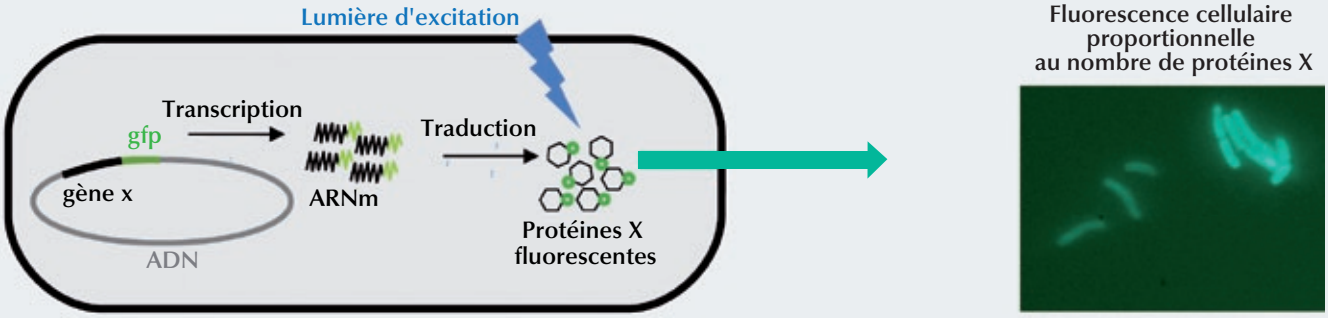
Une des premières et plus belles expériences qui a démontré l'existence et l'importance de telles fluctuations est celle de

›››




**1. Représentation schématique de la réaction de transcription.** L'ensemble *E* représente l'enzyme ARN-polymérase (Pol) et le substrat d'ADN (en bleu), le substrat *B* représente les acides nucléiques (dNTP, en vert) et le produit *A* de la réaction représente les molécules d'ARN résultantes (en rouge). L'ARN-polymérase est un complexe enzymatique qui synthétise l'ARN à partir de l'ADN. La flèche ↱ indique le site du début de la réaction.
À gauche, un exemple de distribution du nombre de molécules d'ARN obtenu en régime stationnaire ($t \to \infty$), pour trois ordres de grandeur de la moyenne de ce nombre (c'est-à-dire du rapport production/destruction) : $\langle n \rangle = k_+/k_- = 10\ 000, 100, 1$. Quand $k_+/k_- \sim 1$, le nombre moyen de molécules est faible et les fluctuations dominent.

**2. Images en contraste de phase (a) et de bioluminescence (b) des bactéries individuelles *Vibrio Harveyi*.**
La bioluminescence est une réaction biochimique avec émission de photons.
(a) Ces bactéries marines ont la forme de bâtonnets, d'environ 1,5 µm de longueur et 0,5 µm de largeur, apparaissant foncés en microscopie de contraste de phase.
(b) Elles deviennent naturellement bioluminescentes (émettrices de photons) lors de l'ajout d'un inducteur (molécule de signalisation, ici une homosérine lactone). Pour détecter la bioluminescence des bactéries individuelles, nous acquérons une image pendant 3 minutes dans le noir complet. On remarque que, même si les bactéries ont des génomes identiques (isogéniques), dans des conditions externes identiques leur réponse à un inducteur est d'une intensité très différente.
(c) La distribution des densités de bioluminescence de chaque cellule est décrite par une distribution Gamma (voir encadré statistique).




**3. Pour étudier la concentration d'une protéine X, on la fusionne avec une protéine fluorescente** (comme, par exemple, la GFP – Green Fluorescent Protein – dont les découvreurs ont reçu le prix Nobel de biologie en 2008). La fusion se fait en introduisant dans le génome de la bactérie la séquence d'ADN codant pour la protéine fluorescente (gfp) à la suite du gène x codant pour la protéine X. La machinerie cellulaire viendra ensuite lire cette séquence ADN, la transcrire en ARN messager et traduire ces ARNm en de nouvelles protéines composées des deux parties assemblées : la protéine X et celle fluorescente. Le niveau de fluorescence des cellules (ayant, dans l'image à droite, la forme de bâtonnets plus ou moins brillants, c'est-à-dire fluorescents) est alors proportionnel au niveau de production de la protéine étudiée et l'on peut, en mesurant quelques centaines de cellules, obtenir la distribution du nombre des protéines dans des cellules.

Novick et Weiner en 1957, à une époque où l'on ne disposait d'aucun outil moléculaire et où le mécanisme même de la régulation génétique n'avait pas encore été découvert. En observant la capacité d'un ensemble d'*E. coli* à digérer le lactose (un sucre), ils ont démontré que les bactéries, toutes issues du même clone (et donc possédant le même génome) et baignant dans exactement le même environnement, formaient deux populations distinctes capables ou non de digérer ce sucre. Fait encore plus troublant, cette capacité, reliée à la concentration d'une enzyme (*β-galactosidase*) dans la cellule, pouvait se transmettre aux descendants de celle-ci. Nous savons maintenant que les produits des réactions métaboliques, bien qu'initialement sous le contrôle de l'ADN, peuvent avoir deux états stables. Cette bistabilité est due à l'existence de boucles de rétroactions positives. Le « réacteur chimique » bactérien tombe dans l'un ou l'autre de ces états par fluctuation et y demeure ensuite.

D'autres expériences ont continué ces observations ; mais ce n'est qu'avec l'arrivée des outils de la biologie moléculaire et des marqueurs fluorescents tels que la protéine GFP (Green Fluorescent Protein), que l'étendue de la variabilité a pu être caractérisée quantitativement. Par le biais de l'ingénierie moléculaire, on peut, par exemple, forcer une cellule à produire des protéines chimériques qui, d'une part, gardent leur fonction originale et, de l'autre, sont fluorescentes, permettant ainsi de lire optiquement le niveau d'une réaction chimique (fig. 3). À partir des observations au microscope, couplées à l'analyse d'images, on peut alors constituer une statistique sur des centaines, voire des milliers de cellules et avoir accès à la probabilité $P(n,t)$ d'observer $n$ protéines dans une cellule au temps $t$ (voir encadré statistique).

Les différentes mesures (par des outils optiques ou biochimiques) ont permis de démontrer que les fluctuations sont extrêmement répandues ; des amplitudes de fluctuations très importantes ont été observées dans de nombreux systèmes, allant de l'expression de protéines chez les bactéries à des systèmes plus complexes, comme la maturation des ovocytes sous l'effet de la progestérone. Les fluctuations sont le résultat combiné de nombreux facteurs, comme la quantité d'enzymes présente dans l'ensemble de la cellule (voir l'exemple de l'ARN polymérase en figure 1) et le bruit propre de chaque réaction chimique.

Des expériences astucieuses ont permis dans certains cas de mesurer séparément l'influence de ces divers facteurs et d'obtenir parfois des lois de probabilité génériques. Par exemple, pour un simple processus de transcription/traduction, en régime stationnaire, si le nombre de protéines par cellule est suffisamment grand pour que l'on puisse approcher la concentration $x$ de cette protéine par cellule par une variable continue, la distribution de la concentration $P(x)$ est décrite par une distribution Gamma (fig. 2). Cette dernière est souvent observée quand une des réalisations d'un processus aléatoire déclenche un autre processus aléatoire.

## Contrôler les fluctuations

Pour fonctionner, un organisme vivant doit pouvoir conserver le même comportement dans un environnement donné et donc contrôler l'amplitude de ses fluctuations. Un nombre important de circuits de régulation génétiques et métaboliques sont dédiés à cette tâche, et nous commençons à comprendre les principes de régulation les plus simples. Pour réguler le niveau d'un certain signal, les ingénieurs humains utilisent la rétroaction négative[1] (contre-réaction). Ce mécanisme est également répandu dans le monde du vivant, et nous connaissons chez les bactéries un nombre important de gènes qui s'autorégulent négativement. Une simple autorégulation négative est seulement un des chaînons de la régulation dans le monde vivant ; quand la précision est très importante pour la survie, nous pouvons observer des bijoux d'ingénierie d'une précision inouïe.

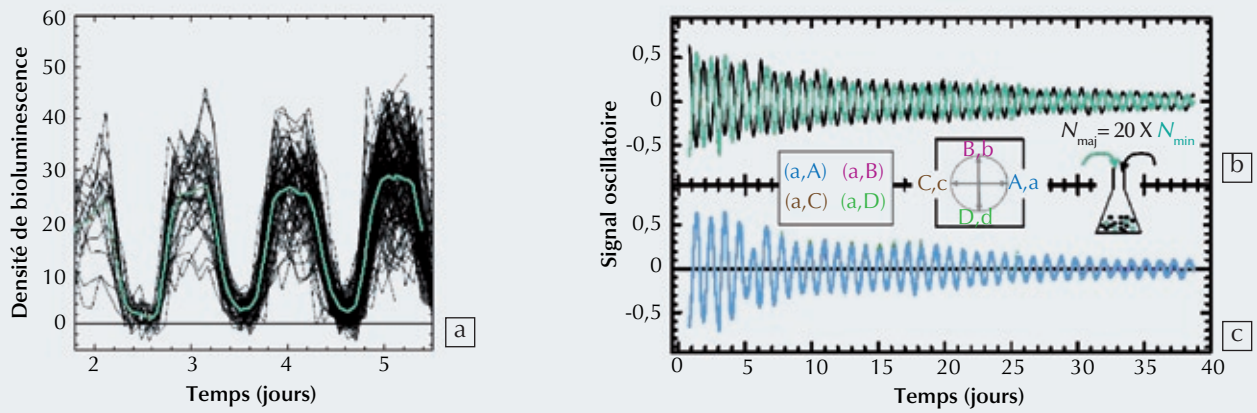
Un exemple récent est celui du rythme circadien (oscillation nocturne/diurne) chez la cyanobactérie, responsable de l'apparition de l'oxygène[2] sur Terre il y a quelques deux milliards d'années. Cette bactérie, qui est l'organisme le plus simple à posséder un oscillateur biochimique auto-entretenu de période d'environ 24 heures, est capable de conserver la phase de son oscillation sans aucun indicateur extérieur (comme la lumière) pendant plusieurs mois [2]. Pendant longtemps, on a supposé que cette précision résultait d'un phénomène collectif, la communication entre bactéries permettant d'augmenter le nombre effectif de molécules en interaction. Par des expériences où deux populations de bactéries ayant des phases initiales différentes ont été mises ensemble et suivies sur de longues périodes de temps (fig. 4), nous avons démontré qu'en réalité il n'en était rien [3]. Chaque population garde sa propre phase, donc chaque bactérie est capable, en utilisant peu de molécules, de conserver une excellente précision de phase, ce qui semble défier la thermodynamique.

Un autre exemple, où la précision est importante, est le développement embryonnaire. Lors de cette étape de la vie multicellulaire, différents tissus sont créés à partir des cellules souches et se différencient au fur et à mesure. Il est essentiel pour un animal de contrôler précisément la taille et surtout la proportion de ses membres. Le programme génétique couramment utilisé par la nature pour la différentiation cellulaire est le suivant : un gradient chimique d'une molécule (appelée morphogène) est créé à travers l'embryon ; chaque cellule « lit » ce signal et enclenche, de façon « tout ou rien », sa différentiation en fonction du niveau du morphogène présent à sa position. Chaque cellule différenciée peut à son tour produire un nouveau morphogène et provoquer d'autres cascades de différentiation. Ce programme simple est beaucoup trop sensible à toutes sortes de fluctuations et, *a priori*, ne garantit pas la précision des proportions chez les descendants. Le circuit génétique de base doit donc être complété par des circuits correcteurs d'erreurs. Nous pouvons seulement observer l'extrême efficacité de ces circuits, sans encore entièrement comprendre leur fonctionnement [4].

## Utiliser les fluctuations

Le monde vivant sait également exploiter les fluctuations aléatoires. L'exemple le plus évident est, bien sûr, l'évolution darwinienne, où les erreurs aléatoires de duplication d'ADN (les mutations) permettent à un organisme, *via* la sélection naturelle, de s'adapter à son milieu à travers les générations.

Le même phénomène peut également se rencontrer sur des échelles de temps beaucoup plus courtes et a été, par exemple, récemment mis en évidence dans le cas de la persistance bactérienne chez *E. coli*. Cette bactérie peut vivre, soit dans un état métabolique à multiplication rapide en puisant abondamment dans le milieu qui l'entoure, soit dans un état métabolique à multiplication lente en consommant très peu de ressources. Une commutation aléatoire entre les deux états maintient une faible proportion de la population dans l'état défavorable à multiplication lente ; cette faible proportion est en grande partie




**4. Exemple d'oscillation synchrone des bactéries individuelles et de leur descendance, suivie par microscopie de bioluminescence.**
(a) Sous le contrôle de l'oscillateur central, la production de l'ensemble des protéines chez la cyanobactérie *Synechococcus elongatus* a une composante périodique. Nous suivons ici cette oscillation en utilisant comme rapporteur la bioluminescence. Chaque courbe noire représente le signal émis par une bactérie, la courbe verte la moyenne de ces dernières.
(b) L'oscillation circadienne normalisée de deux populations de cellules indépendantes (domaines vert et noir) ayant une phase initiale opposée garde cette opposition de phase pendant plusieurs semaines. Pour chaque couleur, 8 à 12 courbes expérimentales sont superposées. À noter que seule l'information de phase est pertinente, car l'amplitude est plus sensible à la variation du métabolisme cellulaire tout au long d'une expérience.
(c) Pour tester l'hypothèse d'un couplage entre oscillateurs, nous avons mélangé deux populations de cellules de phases initiales différentes : une « majoritaire » en nombre 20 fois plus grand que l'autre, « minoritaire ». Les mélanges d'une population minoritaire, avec 4 populations majoritaires différentes (domaines bleu, violet, marron et vert) n'affectent pas l'oscillation des minoritaires. (a,A), (a,B), (a,C) et (a,D) désignent respectivement le mélange d'une population majoritaire de phase initiale A, B, C ou D (séparées de 90°), avec une population des minoritaires de phase A (désignée ici comme a). Chaque mélange a été fait en 8 à 12 exemplaires, tous représentés sur la figure. Dans ce cas, on ne détecte que la population minoritaire a (bleue), car ici la population majoritaire n'est pas munie d'un marqueur bioluminescent. (D'après [3] et [4]).

## Rappels de statistique

Les réactions chimiques sont probabilistes par nature. Considérons, par exemple, une réaction enzymatique élémentaire $E + B \leftrightarrow E + A$, où les concentrations de l'enzyme $E$ et du substrat $B$ sont à un niveau saturant (maintenues ainsi par une dynamique rapide, comparée à la synthèse des molécules $A$). Ceci peut schématiser une version rudimentaire de la synthèse d'ARN (fig. 1, p. 18).

Pour décrire une telle réaction, nous devons calculer la probabilité $P(n,t)$ d'observer $n$ molécules $A$ à l'instant $t$. Connaissant cette fonction, nous pouvons accéder à la moyenne $\langle n(t)\rangle$ et à la déviation $\sigma(t)$ que nous appelons *fluctuations* dans cet article. En général, de tels processus obéissent à une statistique de Poisson, et $\sigma(t)/\langle n(t)\rangle = \langle n\rangle^{-1/2}$. L'amplitude relative des fluctuations $\sigma/\langle n\rangle \to 0$ quand $\langle n\rangle \gg 1$.

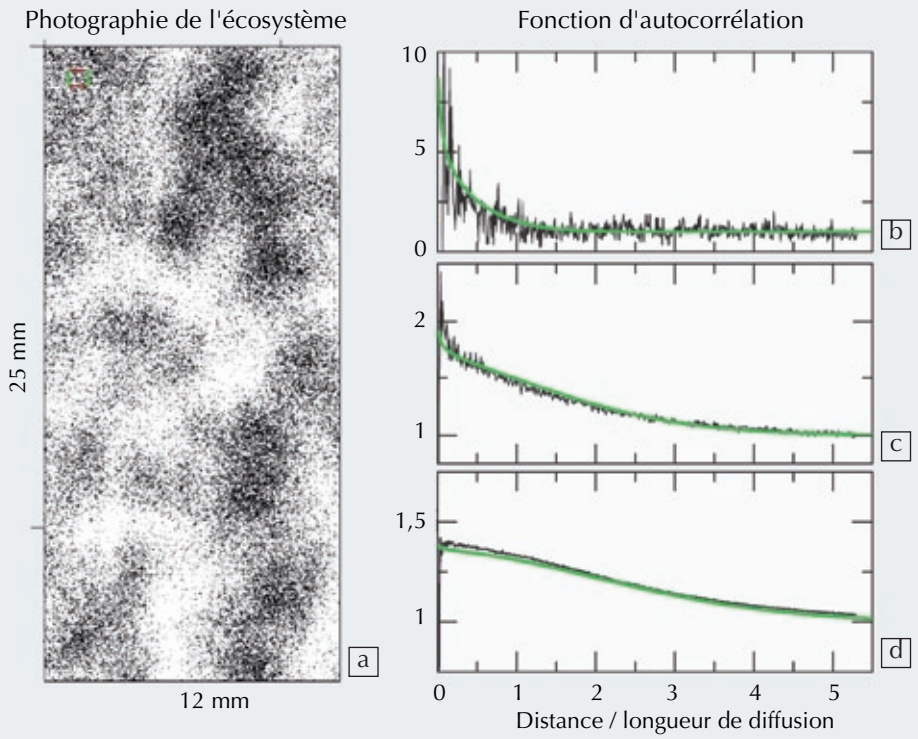
L'équation de cette réaction peut s'écrire en termes d'évolution de $P(n,t)$ :
$\partial P(n,t)/\partial t = k_+ [P(n-1,t) - P(n,t)] + k_- [(n+1)P(n+1,t) - nP(n,t)]$, où $k_+$ et $k_-$ sont les taux de production et de destruction des molécules $A$. Dans cette réaction, la probabilité de production des molécules $A$ est indépendante de leur nombre et ne dépend que du substrat et de l'enzyme. Par contre, la probabilité de destruction des molécules $A$ augmente linéairement avec leur nombre. C'est pourquoi ces deux termes ne sont pas symétriques dans l'équation maîtresse. Les variations temporelles de la moyenne, $\langle n(t)\rangle = \Sigma_n[nP(n,t)]$, et de la variance, $\sigma^2(t) = \Sigma_n[(n - \langle n\rangle)^2 P(n,t)]$, peuvent être directement déduites de cette équation : $d\langle n\rangle/dt = - k_-\langle n\rangle + k_+$, $d\sigma^2/dt = - 2k_-\sigma^2 + (k_+ + k_-\langle n\rangle)$, dont les solutions stationnaires ($t \to \infty$) sont $\langle n\rangle = k_+/k_-$, $\sigma^2 = k_+/k_-$ et $\sigma^2/\langle n\rangle = 1$. Ceci est caractéristique d'une distribution de Poisson : $P(n) = e^{-\lambda} (\lambda^n /n!)$. Ici, $\lambda = k_+/k_-$.

Dans les cellules, un grand nombre de réactions de ce genre sont mises en série. Par exemple, chaque molécule d'ARN produite pilote elle-même la production de plusieurs protéines par des réactions enzymatiques similaires. Le résultat est que la probabilité d'observer $n$ protéines, $P_{protéines}(n)$, est la composition de deux lois de probabilité, qui souvent peut être approchée par une distribution Gamma : $P_{protéines}(n) = n^{a-1} \exp(-n/b) / [b^{a-1} \Gamma(a)]$. Dans cette fonction, $n$ est le nombre de protéines (considéré grand), $a$ le nombre moyen d'ARN généré pendant le temps de vie d'une protéine, $b$ le nombre moyen de protéines produit pendant le temps de vie d'un ARN et $\Gamma$ est la fonction Gamma. Quand le nombre moyen de protéines est grand, la variable $n$ peut être considérée comme une variable continue.

›››
le résultat de la différence entre les taux de multiplication dans les deux états. En présence d'antibiotiques dans le milieu, les bactéries se trouvant dans l'état à multiplication rapide meurent ; les autres, communiquant peu avec l'extérieur, survivent encore longtemps. Une fois l'antibiotique enlevé, une proportion de bactéries à multiplication lente bascule aléatoirement dans le mode rapide et repeuple la niche écologique. De façon générale, il apparaît que dans les environnements variables un gène dont le produit est plus aléatoire peut conférer à l'organisme un avantage.

## Fluctuations à grande échelle spatiale

Les phénomènes de fluctuations que nous venons de décrire à l'échelle de la cellule ou de l'organisme peuvent avoir des conséquences sur des échelles spatiales bien plus vastes. Un exemple important est celui de la répartition des espèces dans la nature : de façon quasi générale, les individus d'une espèce donnée ne sont pas répartis de façon homogène dans l'espace, mais présentent systématiquement des distributions agglomérées. Ce phénomène avait d'abord été remarqué dans le cas des planctons à la surface des océans ; depuis,




5. **Évolution de la distribution spatiale à grande échelle de micro-organismes (l'amibe *D. discoideum*).**
(a) Distribution spatiale après 9 générations dans un écosystème homogène (12 x 25 mm), mesurée par une combinaison de techniques de microscopie et d'analyse d'image. Chaque point représente un micro-organisme.
(b-d). Évolution de la fonction d'autocorrélation spatiale (histogramme des distances entre tous les individus) mesurée (noire), et sa comparaison à la théorie purement stochastique (vert) à 1 (b), 4 (c) et 9 (d) générations (d'après [5]). La théorie stochastique décrit l'évolution de l'histogramme des distances entre paires d'individus : chaque naissance enrichit les très courtes distances dans l'histogramme, puisque chaque individu apparaît proche de son parent ; le mouvement brownien tend ensuite à augmenter cette distance initiale, c'est-à-dire réduire l'histogramme pour les faibles distances et l'enrichir pour les grandes distances ; les morts, enfin, réduisent l'histogramme uniformément.

sur les centaines d'espèces de divers règnes étudiés à différentes échelles, seules quelques-unes suivent une répartition purement « poissonienne ». Les théories classiques de l'écologie cherchent l'origine de ces agglomérats dans l'hétérogénéité géographique (lacs, montagnes, gradients de dénivelés…) et l'adaptation des espèces aux niches. Cependant, ces fluctuations peuvent simplement provenir des phénomènes aléatoires asymétriques que sont les morts et les naissances : on naît proche de ses parents, mais on peut mourir partout, favorisant ainsi les courtes distances entre individus. La diffusion et les mouvements aléatoires ne sont pas suffisants pour lisser les hétérogénéités créées par ces phénomènes stochastiques.

Nous venons de démontrer, dans un écosystème expérimental contrôlé et parfaitement homogène, que la distribution des individus devient, au bout de quelques générations, extrêmement agglomérée et exactement prédictible par des théories probabilistes ne tenant compte que des naissances, morts et migrations [5]. Observer des hétérogénéités spatiales de distribution des espèces ne doit donc pas être surprenant *a priori* (fig. 5).

## Conclusion

Les fluctuations stochastiques sont devenues un thème central de la biologie, grâce à une collaboration active entre, d'une part, les physiciens contribuant par les concepts et les outils de la physique statistique et des processus stochastiques et, d'autre part, les biologistes apportant leur compréhension de la complexité du monde vivant et la maîtrise des outils modernes de la biologie moléculaire. Les scientifiques ont ainsi compris que pour contrôler les fluctuations, là où la précision est vitale, les cellules dédient une part importante de leurs ressources à des « circuits » correcteurs d'erreur d'un grand raffinement ; mais aussi, que là où la précision n'est pas vitale, une certaine variabilité est *maintenue* pour conférer à l'organisme un avantage dans un environnement extérieur fluctuant.

Beaucoup de chemin reste à parcourir pour avoir une vue générale des fluctuations biologiques, semblable à celle que la physique statistique nous confère pour les fluctuations thermiques. Nous avons besoin de plus de données expérimentales pour étoffer nos connaissances, ainsi que d'outils théoriques pour analyser les circuits génétiques / métaboliques complexes que le monde vivant utilise. Nous ne sommes qu'au début de l'exploration de ce domaine. ▮

## Références

1 • A. Raj, A. van Oudenaarden, "Nature, nurture, or chance: stochastic gene expression and its consequences", *Cell*, **135** (2008) 216-226.

2 • B. Houchmandzadeh, E. Wieschaus, S. Leibler, "Establishment of developmental precision and proportions in the early Drosophila embryo", *Nature*, **415** (2002) 798-802.

3 • I. Mihalcescu, W. Hsing, S. Leibler, "Resilient circadian oscillator revealed in individual cyanobacteria", *Nature*, **430** (2004) 81-85.

4 • M. Amdaoud, M. Vallade, C. Weiss-Schaber, I. Mihalcescu, "Cyanobacterial clock, a stable phase oscillator with negligible intercellular coupling", *Proc Natl Acad Sci U S A.*, **104** (2007) 7051-7056.

5 • B. Houchmandzadeh, "Neutral clustering in a simple experimental ecological community", *Phys. Rev. Lett.*, **101** (2008) 078103.

(1) En théorie de contrôle, la régulation négative, ou boucle de rétroaction négative, permet qu'une partie du signal de sortie d'un dispositif soit réinjectée à l'entrée avec un signe inversé, stabilisant ainsi la réponse du dispositif.

(2) L'atmosphère terrestre ne contenait pas d'oxygène jusqu'à il y a environ 2 milliards d'années. Le succès évolutif des organismes photosynthétiques (essentiellement des cyanobactéries) produisant l'oxygène comme un déchet de la photosynthèse, a globalement modifié la composition de l'atmosphère qui actuellement contient environ 20% d'oxygène.

# La (regrettable) complexité des systèmes économiques

**Jean-Philippe Bouchaud** (jean-philippe.bouchaud@cea.fr)
Capital Fund Management, 6 bd Haussmann, 75009 Paris
et École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex

Il est de plus en plus clair que la dynamique erratique des marchés financiers est en très grande partie endogène – c'est-à-dire qu'elle résulte du fonctionnement interne des marchés et des boucles de rétroaction qui y sont présentes – plutôt que la conséquence de réactions rationnelles à des événements exogènes.

Cette dynamique erratique a de nombreux points communs avec celle des systèmes physiques dits « complexes », comme les aimants désordonnés, où la combinaison hétérogénéités-compétition conduit de manière générique à de longues périodes de stases interrompues par des crises violentes, et à une hypersensibilité à de faibles changements des paramètres extérieurs. Ces systèmes physiques pourraient s'imposer comme des métaphores utiles de la complexité des systèmes économiques.

Cet article est une version élaborée d'un article paru en langue anglaise dans *Physics World* **22**, n°4 (2009), pp. 28-32.

La crise actuelle met la pensée économique classique sous pression extrême ; j'espère d'ailleurs qu'elle ne s'en remettra pas. La théorie classique veut qu'un marché complètement dérégulé atteigne un équilibre « efficient », qui permet une allocation optimale des ressources, et dont les prix reflètent parfaitement, de manière non biaisée, toute l'information disponible. De tels marchés devraient être stables : les crises ne peuvent apparaître qu'à l'occasion de chocs *exogènes*, mais jamais à cause de leur dynamique interne, qui serait faite de petites fluctuations – supposées gaussiennes – rapidement éteintes grâce à l'action d'agents rationnels prompts à « arbitrer », c'est-à-dire tirer profit de ces erreurs d'appréciations en les faisant disparaître.

On mesure depuis quelques mois l'ineptie d'un tel cadre théorique qui, pourtant, depuis sa formalisation mathématique des années 50 et 60, a revendiqué haut et fort le statut de théorie scientifique. Sa supposée victoire théorique (contre Keynes en particulier, dont la profondeur de pensée reste incroyablement actuelle) a été telle que plusieurs générations de dirigeants et de conseillers en ont fait leur *vade-mecum*, justifiant une politique de dérégulation des marchés de plus en plus agressive depuis une trentaine d'années, et qui est partiellement responsable de la crise. Toute contrainte est en effet censée éloigner les marchés de leur équilibre parfaitement efficient.

Alan Greenspan lui-même avouait son désarroi en novembre dernier : *"Those of us who have looked to the self-interest of lending institutions to protect shareholders' equity, myself included, are in a state of shocked disbelief"*, avant d'ajouter : *"Yes, I've found a flaw in the theory. I don't know how significant or permanent it is. But I've been very distressed by that fact."* Il parlait de la théorie des marchés efficients, qui lui semblait tout d'un coup infondée.

La théorie des agents rationnels a pourtant étendu son emprise sur d'autres domaines – aussi effarant que cela puisse paraître, il existe des théories rationnelles du mariage, du chômage, de l'obésité, de la toxicomanie, etc. Ce n'est pas le lieu de développer cette polémique ; mais, du point de vue de ses conséquences politiques et sociales, l'idée de l'homme infiniment rationnel, infaillible et donc irrémédiablement responsable de ses choix, me semble à titre personnel regrettable et terriblement dangereuse.

Mais cette idée est surtout non fondée scientifiquement, pour un certain nombre de raisons que je voudrais détailler. Lors de la première conférence de Santa Fe regroupant physiciens et économistes, Phil Anderson a émis son fameux *"Do you guys really believe that ?"*, qui résume assez bien la réaction des physiciens à ces hypothèses qui paraissent très peu plausibles et choquent l'intuition. En réalité, un certain nombre d'économistes sont eux-mêmes convaincus que ces hypothèses sont inadéquates. Pourtant, le mythe perdure et les manuels ont du mal à évoluer. Un argument souvent avancé est qu'il vaut mieux garder une hypothèse fausse qui permet le développement d'une théorie mathématique rigoureuse, plutôt que de s'aventurer dans la modélisation de l'infinie manière dont les agents pourraient ne pas être rationnels. Il me semble pourtant primordial que la modélisation en économie et en sciences sociales cherche à décrire l'homme tel qu'il est et non tel qu'il devrait être selon la théorie – émotif et capable d'erreurs plutôt que calculateur et infaillible.

© paris pao

> « Il me semble primordial que la modélisation en économie et en sciences sociales cherche à décrire l'homme tel qu'il est et non tel qu'il devrait être selon la théorie – émotif et capable d'erreurs plutôt que calculateur et infaillible. »

## Dynamique exogène ou endogène ?

L'un des points les plus importants à comprendre, remis sur le devant de la scène en cette période de crise, est celui de la nature *endogène* ou *exogène* des fluctuations des marchés. Dans un marché efficient au sens informationnel, les prix reflètent la valeur intrinsèque des actifs, qui n'évoluent que sous l'effet de nouvelles exogènes. Un krach boursier ne peut donc se produire que si les conditions extérieures au système économique lui-même changent brutalement. Par exemple, un tremblement de terre à Tokyo qui détruit matériellement les infrastructures d'une société. De manière moins spectaculaire, le prix d'une société cotée ne devrait changer significativement que lorsque tombe une nouvelle concernant les perspectives futures de son activité.

Plusieurs travaux ont cherché à tester cette idée quantitativement, avec des résultats négatifs. Par exemple, Cutler, Poterba et Summers en 1989, dans *What moves stock prices?*, concluent qu'il est difficile d'attribuer la volatilité des marchés à des nouvelles macroéconomiques ou politiques. Robert Shiller a démontré l'innocuité des nouvelles qui entourent le « grand krach » de 1987. Plus récemment, nous avons mené une étude exhaustive des changements de prix des actions, échantillonnés à la minute et synchronisés avec le flux de dépêches. Nous avons trouvé que seulement 5% des sauts importants peuvent être attribués à une nouvelle concernant la société en question ; la majorité des sauts semblent être induits par la dynamique intrinsèque des marchés eux-mêmes. D'ailleurs, les deux types d'événements conduisent à des « répliques » (au sens des tremblements de terre) de signatures statistiques très différentes, ce qui montre bien qu'ils sont de nature distinctes.

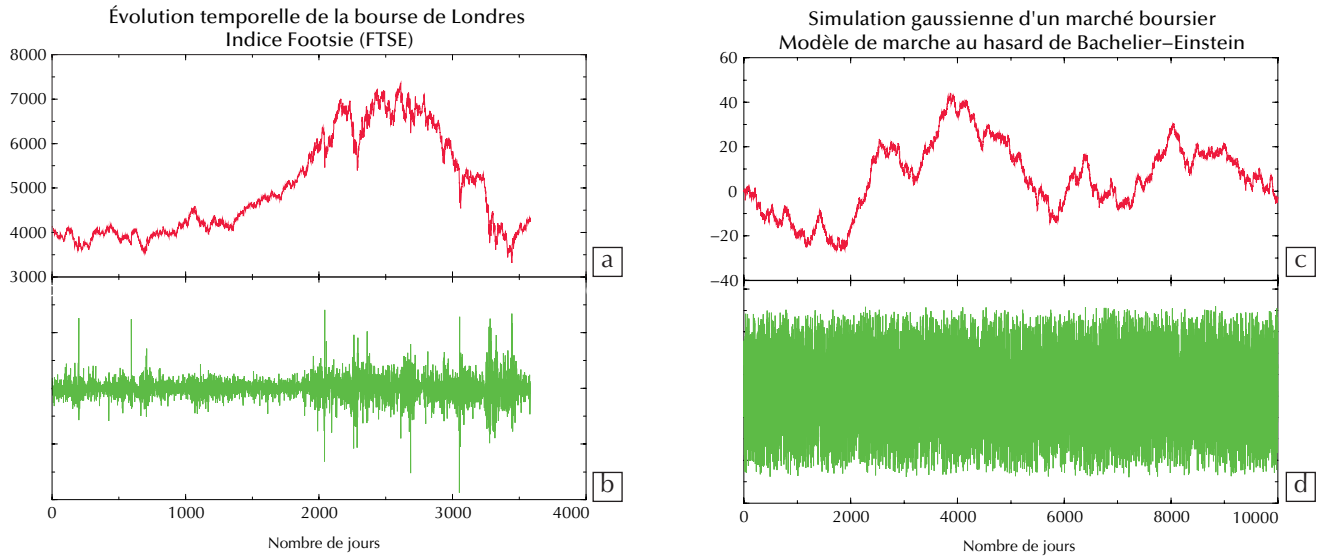
De manière plus globale, la statistique des variations de prix montre des spécificités qui ne sont pas naturelles dans le contexte de l'équilibre : distribution de Pareto (en loi de puissance, $x^{-\alpha}$) et donc fortement non gaussienne des variations de prix, intermittence multi-échelle de la volatilité (fig. 1), etc. La nature non gaussienne des fluctuations remet très sérieusement en cause la validité d'un standard de l'industrie financière : l'équation de Black-Scholes des options ou, de manière plus crue, le mythe du risque nul, qui sous-tend l'approche (trop) classique des mathématiques financières de valorisation par réplication parfaite (cf. encadré 1, p. 25), opération uniquement possible sous des hypothèses très fortes de fluctuations gaussiennes qui permettent en effet de se débarrasser du risque. Cette approche, encore dominante dans les manuels et les esprits, conduit à une mauvaise intuition et une déresponsabilisation vis-à-vis du risque. L'ironie est que l'utilisation de l'équation de Black-Scholes, qui néglige la probabilité des grands mouvements, a eu comme conséquence d'amplifier considérablement le krach de 1987 par un effet de rétroaction positive des ordres de vente sur les prix !

## Impact et boucles de rétroaction

Un effet crucial ici, négligé (à vrai dire escamoté) par la théorie économique classique, est l'impact des transactions sur les prix. Dans la vision classique, la valeur fondamentale est fixée en dehors des marchés eux-mêmes, qui ne font que la révéler en agrégeant l'information des opérateurs. En aucun cas les transactions « non informées » ne devraient affecter les prix, sinon on observerait un découplage entre valeur fondamentale et prix du marché.

L'accès aux données de ultra-haute fréquence (en dessous de la seconde), qui permet de suivre l'évolution du marché ordre par ordre, montre que chaque transaction, informée ou non, impacte les prix faiblement, certes, mais de manière systématique et mesurable (l'ordre de grandeur est de quelques % de % pour 1% du volume quotidien). L'existence de cet impact complète et renforce l'argument selon lequel les fluctuations de prix sont principalement endogènes. L'impact des transactions peut faire naître des boucles de rétroactions. Par exemple, l'utilisation du modèle de Black-Scholes conduit mécaniquement, dans certains cas, à une avalanche d'ordres de vente lorsque le cours baisse – précisément ce qui s'est passé en 1987. Ces boucles de rétroaction déstabilisantes sont monnaie courante, si l'on ose dire, et les plus embarrassantes sont celles qui sont dues à la théorisation des marchés ; la crise actuelle est, à nouveau, une illustration d'école de la nocivité potentielle des dogmes et de la modélisation. La sous-estimation du risque de défaut collectif d'un grand nombre d'entreprises dans les modèles de dérivés de crédit (les fameux CDOs) ont contribué à engendrer la crise, et donc le défaut collectif lui-même !

›››




**1. Marchés financiers : le Footsie et le mouvement brownien de Bachelier.** On montre deux façons de représenter l'évolution temporelle des prix : le prix en fonction du temps (figs 1-a et 1-c), et sa « dérivée », c'est-à-dire les variations quotidiennes du prix, toujours en fonction du temps (figs 1-b et 1-d). Les deux cas considérés sont l'indice Footsie (FTSE) de la bourse de Londres (figs 1-a et 1-b), et les mouvements de prix synthétiques en supposant le modèle de mouvement brownien de Bachelier et Black & Scholes (figs 1-c et 1-d). Les différences entre le modèle et la réalité apparaissent à l'œil nu. Les « pics » observés sur la figure 1-b correspondent aux grands mouvements de prix (à la hausse ou à la baisse), qui sont absents dans le modèle gaussien. La nature intermittente et multi-échelle des fluctuations est aussi apparente : les grands mouvements se produisent en grappe, et ces épisodes peuvent aussi bien durer *une minute que dix ans* (comme après la crise de 1929) ! La nature intermittente de la dynamique des prix suggère des analogies possibles avec d'autres systèmes complexes étudiés par les physiciens : la turbulence, le bruit Barkhausen (fig. 2), le mouvement des fissures dans les matériaux hétérogènes ou d'une ligne de contact sur un substrat rugueux.

›››

## Analogies physiques

Revenons au caractère « anormal » de la statistique des fluctuations de prix : distribution en loi de puissance des variations de prix, intermittence multi-échelle de la volatilité, etc. Une observation très importante est l'universalité de ces résultats : il semble que quel que soit l'actif traité – actions, devises, matières premières, ou même la volatilité implicite sur les marchés d'options (voir encadré 1), à Londres ou à Tokyo, il y a 200 ans sur les marchés de céréales ou maintenant – on observe à peu près les mêmes caractéristiques. La phénoménologie empirique, en particulier les lois de puissance et la dynamique intermittente, frappe l'imagination du physicien statisticien car de nombreux systèmes complexes partagent cette phénoménologie, et le point crucial est que cette dynamique intermittente est purement *endogène*. Citons par exemple les écoulements turbulents, la progression d'un front de fissure dans un matériau désordonné, le retournement de l'aimantation dans un ferromagnétique désordonné (bruit dit de Barkhausen, figure 2). Dans tous ces exemples, le forçage extérieur, la dynamique *imposée*, est lente et régulière, mais la dynamique *réalisée* est, elle, irrégulière, intermittente, faite de périodes calmes et statiques interrompues par des bouffées instables, des avalanches d'activité. Par exemple, le front de fissure se coince temporairement avant d'avancer par à coups. Même si comparaison n'est pas raison, ces analogies sont frappantes.

Je voudrais discuter la façon dont des éléments, à mon avis essentiels, laissés de côté dans la modélisation classique de l'agent rationnel, pourraient assez naturellement conduire à une dynamique intermittente et « chaotique », endogène aux marchés.

Un premier ingrédient crucial est l'imitation dans la prise de décision. La transcription du « modèle d'Ising en champ aléatoire » (RFIM, voir encadré 2, p. 26) permet de décrire des situations où il y a conflit entre opinions individuelles, information publique et pression sociale. Imaginons un ensemble d'agents qui ont des opinions *a priori* divergentes, par exemple optimistes (acheteurs) et pessimistes (vendeurs), avec toutes les gradations intermédiaires. Ces agents aux opinions hétérogènes sont par ailleurs influencés par des facteurs globaux qui évoluent lentement, par exemple les taux d'intérêt, l'inflation, les prévisions de dividendes futurs, etc. On suppose qu'il n'y a pas de « chocs », de discontinuités dans l'évolution de ces facteurs exogènes. Mais on postule que nos agents sont influencés par l'opinion de la majorité, ce qui semble un trait psychologique assez évident, amplifié par une pratique généralisée de jugement par comparaison, surtout en finance : on est toujours pardonné d'avoir eu tort avec la masse, et il est parfois difficile de justifier que l'on puisse avoir raison tout seul. Bref, dans ce modèle, on adopte l'opinion de la majorité si sa propre conviction *a priori* est plus faible que sa propension à l'imitation grégaire.

Si tous les agents prenaient leur décision dans la solitude de l'isoloir, sans prêter attention à ce que pensent les autres (donc une propension à l'imitation nulle), l'opinion agrégée suivrait fidèlement les influences externes et, par hypothèse, évoluerait continûment. Mais de manière surprenante, si cette propension à l'imitation dépasse *un certain seuil* critique, l'évolution de l'opinion moyenne peut sauter brutalement, de façon discontinue, de l'optimisme vers le pessimisme, alors que les facteurs extérieurs se dégradent progressivement et continûment. De plus, une hystérèse apparaît. De la même façon que la vapeur saturée refuse de se transformer en liquide, l'état optimiste est maintenu de manière auto-référentielle, bien au-delà du point où les facteurs globaux auraient dû conduire au pessimisme. Lors de l'amélioration, l'optimisme revient lui aussi avec retard, personne ne voulant y croire parce que personne n'y croit.

Bien sûr, ce modèle est extrêmement simplifié, mais on ne peut pas ne pas voir de fortes ressemblances avec toutes les bulles de l'histoire économique et financière. La prise de conscience progressive des montagnes de dettes accumulées par les banques ces

dernières années aurait dû conduire à une correction progressive des marchés, un « atterrissage en douceur », comme prévu par la théorie des marchés efficients. Au contraire, l'euphorie collective a perduré, faisant fi de tous les signes inquiétants avant de devenir insoutenable. La moindre étincelle, un événement anecdotique peut déclencher une crise d'une ampleur incommensurable à sa cause, comme en 1987 ou en 2008.

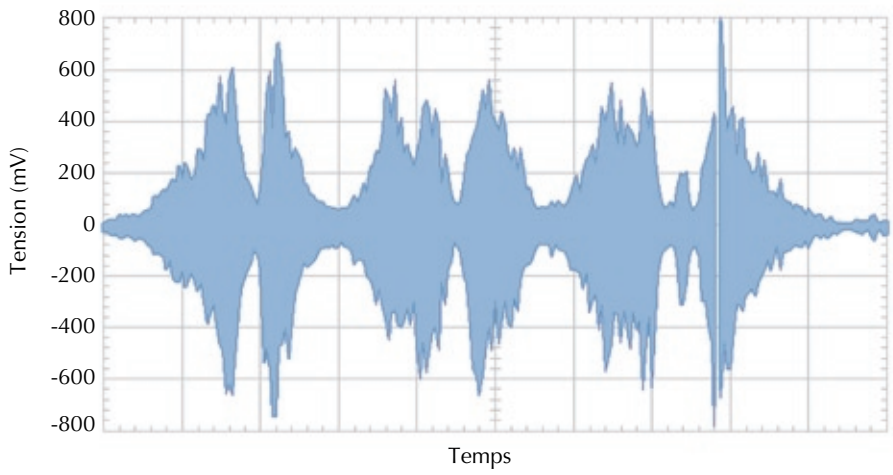
Le modèle RFIM illustre l'impossibilité de représenter l'évolution de l'opinion moyenne, ou de la demande agrégée d'une population hétérogène, par celle d'un agent représentatif. Cette hypothèse est pourtant souvent invoquée pour passer de la modélisation des agents individuels au comportement « macroscopique », comme on dirait en physique, où le passage micro-macro est un thème récurrent et un problème en général difficile, surtout dans les matériaux hétérogènes !

## Utilité et complexité

Je voudrais enfin revenir sur la modélisation classique des comportements individuels, en termes d'agents dits « rationnels ». Ce point de départ est décrit récemment par Ivar Ekeland comme le « cheval de bataille » de l'économie moderne. On suppose que les décisions prises sont le résultat d'un calcul qui permet à l'agent rationnel de maximiser sa « fonction d'utilité », censée mesurer sa satisfaction. Il ne s'agit pas pour lui de se contenter de solutions acceptables, mais bien de trouver le *maximum absolu* de cette fonction.

On peut opposer à cette idée un grand nombre de critiques. Une des plus profondes me paraît concerner le processus de maximisation lui-même. Il semble en effet que les défenseurs de cette théorie aient en tête des fonctions d'utilité que l'on peut qualifier de « simples », par exemple un paraboloïde à maximum unique, et faciles à déterminer – faciles dans un sens algorithmique. Dans cet exemple, une montée suivant le gradient local conduit rapidement au maximum, le temps de calcul croît lentement avec le nombre de variables N et il est plausible que l'esprit humain soit capable d'accomplir une telle tâche. Mais le problème est que ce type de fonction représente l'exception plutôt que la règle, et que de nombreux problèmes d'optimisation sous contrainte ne sont pas de ce type. La physique des verres de *spin* nous a en effet fait comprendre que, de manière générique, l'énergie (analogue

›››




**2. Trace temporelle du « bruit Barkhausen » lors de l'aimantation d'un matériau magnétique désordonné soumis à un champ magnétique extérieur.** Le champ tend à faire bouger les parois entre les domaines + et les domaines – pour faire disparaître les domaines dont l'aimantation lui est opposée. Le bruit Barkhausen est causé par le mouvement intermittent de ces parois lorsqu'elles se dépiègent des impuretés, puis se repiègent à un temps ultérieur. Cette dynamique est une succession *d'avalanches* multi-échelles, qui correspondent à des volumes de toutes tailles balayés par les parois lors de leur décrochement (voir J.P. Sethna *et al.*, *Nature* **410** (2001) 242).

## Options – La réplication parfaite de Black et Scholes

**Encadré 1**

Une option est une sorte d'assurance contre les fluctuations des marchés financiers. Par exemple, on peut vouloir assurer son portefeuille boursier contre un effondrement des cours, et ainsi acheter une « option » qui fournit la garantie d'un prix de rachat minimum de ses actions. De nombreux produits de ce type sont en fait, de façon parfois cachée, déjà disponibles pour le grand public, et portent le nom d'investissements à capital garanti. Dans ce cas, la valeur minimale garantie est le capital initial.

Quel est le montant raisonnable de la prime d'assurance à laquelle doit consentir l'acheteur de l'option ? Le vendeur d'option peut-il suivre une stratégie optimale d'achat et de vente du « sous-jacent » (c'est-à-dire l'objet sur lequel porte l'option) de façon à minimiser son risque ? Il est clair que la réponse à ces deux questions nécessite une description de la dynamique du sous-jacent, un modèle probabiliste de son évolution future. Black et Scholes, en 1973, proposent une solution complète du problème en postulant que le logarithme du prix effectue un mouvement brownien.

La formule qu'ils obtiennent exprime la valeur de l'option comme une fonction de la volatilité du sous-jacent, c'est-à-dire sa propension à fluctuer, son coefficient de diffusion comme on dirait en physique. Les marchés d'options sont ainsi des marchés où s'échangent des anticipations de volatilité future, appelée « volatilité implicite » par les traders options. Mais le résultat le plus frappant de Black et Scholes est que la stratégie optimale est *parfaite*, dans le sens où l'assureur ne prend *aucun* risque ! Autrement dit, la stratégie de couverture permet une réplication parfaite de l'option, puisque les fluctuations de valeur de l'option sont exactement compensées par celles de la stratégie de couverture. Mais ce résultat est intimement lié à la nature supposée gaussienne des fluctuations et à la limite (irréaliste) du temps continu, où la fréquence des transactions tend vers l'infini. En présence d'effets non gaussiens (queues de distributions, volatilité stochastique, voir fig. 1), la possibilité de trouver une stratégie parfaite disparaît, et il subsiste un risque résiduel, qui représente en pratique une fraction très importante de la valeur de l'option.

›››

de la fonction d'utilité) possède un nombre très grand, exponentiel en N, d'extrema locaux, et qu'un très grand nombre d'entre eux sont quasi dégénérés.

On est face à un mur exponentiel de complexité. Le maximum absolu est non seulement très difficile à trouver – le temps nécessaire aux meilleurs algorithmes est lui aussi exponentiel en N –, mais en plus il est à peine meilleur qu'une nuée d'autres maxima locaux. Ce maximum absolu est de surcroît très instable par rapport à de petits changements des paramètres qui déterminent la fonction d'utilité : la position relative des différents maxima locaux s'inverse très facilement. On est dans une situation similaire à celle du chaos des systèmes dynamiques, où une incertitude change la trajectoire et où la maîtrise de celle-ci demande une précision exponentielle. Le maximum absolu n'a donc pas de vertu particulière, et le maximum « acceptable » dépend énormément de l'heuristique, de l'algorithme utilisé pour le trouver.

Dans ce contexte, la théorie de l'agent maximisant me semble en difficulté : comment imaginer que le cerveau humain puisse réaliser rapidement des opérations que les plus puissants ordinateurs, avec les meilleurs algorithmes, sont incapables de faire ? Comment imaginer que tout se passe « comme si » les agents trouvaient leur maximum absolu, alors que celui-ci est intrinsèquement instable ? Ou bien la théorie de l'agent rationnel n'est-elle valable que pour des situations suffisamment simples ? Dans le cas générique, la rationalité est donc *de facto* limitée, la décision finale (qui peut différer notablement dans ses conséquences) dépend de l'algorithme, de l'histoire, du choix précis des paramètres, etc. Même si le problème est intrinsèquement déterministe, il apparaît un aléa qui provient de ce choix incertain, qui fait boule-de-neige – puisque les stratégies individuelles ne peuvent plus supposer la rationalité auto-réflexive et infinie des autres agents.

Plus généralement, les systèmes économiques dans leur ensemble partagent un grand nombre des ingrédients qui sont à la base de la complexité exponentielle des systèmes de type « verres de *spin* » en physique : de nombreuses entités hétérogènes en compétition forte. La dynamique de ces systèmes est particulièrement intéressante et a fait l'objet d'études nombreuses ces dernières années. À cause du très grand nombre de minima locaux de l'énergie qui piègent temporairement le système, son évolution est très lente, avec de longues périodes de stases séparées par de rapides changements de configuration dominante. Le système n'atteint l'équilibre qu'au bout d'un temps extrêmement long, parfois bien plus long que les temps géologiques.

Si la métaphore « verres de *spin* » s'appliquait aux systèmes économiques, un changement profond de paradigme s'imposerait alors :

- la notion d'équilibre, chère aux économistes, perdrait complètement son intérêt puisque le temps d'équilibre serait beaucoup trop long (les verres n'atteignent pas l'équilibre, même après des temps géologiques !) ;
- la dynamique hors équilibre, thème à ma connaissance assez peu abordé par l'économie classique, deviendrait alors le sujet pertinent ;
- les systèmes économiques complexes seraient alors fragiles et sensibles à de petites perturbations, et évolueraient de manière intermittente, en une succession d'époques quasi stables séparées par des « crises » imprévisibles, et ce même si les influences extérieures évoluent lentement et continûment. De « grosses » nouvelles ne sont pas nécessaires pour faire tanguer de tels marchés ; leur instabilité est intrinsèque et vient de la compétition même entre agents hétérogènes.

## Conclusion

Les modèles que je viens d'évoquer sont plus inspirants que convaincants. Ils restent, à ce stade, assez vagues et doivent être approfondis – en particulier en utilisant des simulations numériques de modèles d'agents pour construire des marchés artificiels réalistes. Mais ils racontent des histoires qui me semblent suffisamment intéressantes pour qu'on les prenne au sérieux. L'idée suivant laquelle le mélange compétition/hétérogénéités permet d'expliquer en grande partie les crises endogènes des marchés et des systèmes économiques, me paraît assez plausible pour mériter qu'on s'y attarde.

En attendant, il me semble que l'état d'esprit dans lequel la science économique s'est développée et a irrigué l'ingénierie financière doit évoluer. Les innovations financières doivent être analysées de manière critique, testées et réglementées par une agence indépendante et dotée d'une autorité, comme le sont les innovations dans d'autres industries à risque (nucléaire, chimique, pharmaceutique, aéronautique, etc.) : pourquoi l'industrie financière y échapperait-elle, à part pour des arguments de mauvaise foi dont la justification ultime est la recherche du profit maximum à court terme ? Mon avis est que la crise actuelle, qui a de graves répercussions sur le quotidien des gens, justifie le parallèle avec ces activités humaines dangereuses. Je pense que les préjugés hérités d'une éducation trop formelle, dogmatique et éloignée du réel font partie du problème. Une représentation mentale plus pragmatique, où l'intuition et les mécanismes remplacent l'axiomatisation et les modèles formels, et l'enseignement d'une science économique redevenue avant tout, et farouchement empirique, me semblent être des prérequis pour une stabilité du monde financier sur le long terme. ▮

### Magnétisme désordonné : champs aléatoires et verres de *spin*

Encadré 2

Deux modèles phares ont été introduits pour décrire le magnétisme d'alliages désordonnés : d'une part, le modèle d'Ising en champ aléatoire (RFIM en anglais), dans lequel chaque *spin* interagit de façon ferromagnétique avec ses voisins mais est soumis à un champ de signe aléatoire qui tend à rompre l'ordre ferromagnétique ; d'autre part, le modèle d'Edwards-Anderson (EA) des verres de *spin*, dans lequel l'interaction elle-même est de signe aléatoire, conduisant à un ordre amorphe. L'énergie d'une configuration des N *spins* $S_i$ s'écrit : $H = -\Sigma_i h_i S_i - \Sigma_{ij} J_{ij} S_i S_j$, avec $J_{ij} = J > 0$ et $h_i$ aléatoire pour le RFIM, et avec $J_{ij}$ aléatoire et $h_i = 0$ pour le modèle EA.

Ces modèles ont été l'objet d'études analytiques et numériques intensives au cours des trente dernières années, et sont devenus des paradigmes théoriques pour la compréhension des systèmes complexes, bien au-delà des problèmes magnétiques qui leur ont donné naissance. Ils encodent de manière minimale les effets de compétition entre interaction et hétérogénéité. Un des aspects les plus importants, qui confère à ces modèles une richesse extraordinaire (duale d'une difficulté théorique redoutable) est l'existence d'un nombre exponentiel de **configurations métastables**, c'est-à-dire de minima locaux de l'énergie *H*.

# Prix Jean Perrin 2009 : Marie-Claire Cadeville et Jean-François Mathiot

Marie-Claire Cadeville est directeur de recherches émérite de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg.

Présidente de la section Alsace de la SFP de 1998 à 2002, elle a eu l'occasion de piloter de nombreuses actions de diffusion de la culture scientifique. Les plus notables sont l'organisation de séminaires pour les élèves des classes préparatoires du lycée Kléber, la réalisation de deux expositions en 2001 et 2002 (« Féerie de la lumière » et « Histoire de la physique »), et la sauvegarde du fond de livres anciens de l'Institut de physique de Strasbourg. Elle fut présidente de l'AMUSS (Association de culture et muséographie scientifiques de Strasbourg) de 2001 à 2006. Durant l'année mondiale de la physique, elle a participé à la réalisation d'une exposition « Physiciens en Alsace, témoins de leur temps », accompagnée d'expériences et d'ateliers, qui fut visitée par de nombreux élèves de Strasbourg et sa région. Depuis, son activité vers le milieu scolaire s'est intensifiée, notamment par la mise en place d'un partenariat entre l'association Femmes et Sciences (dont elle est responsable des activités en Alsace) et le rectorat de Strasbourg.

Jean-François Mathiot est directeur de recherches au CNRS, affecté au Laboratoire de physique corpusculaire de Clermont-Ferrand.

Il fut président de la section locale Auvergne de la SFP de 1998 à 2007, et a su en dynamiser les actions. Dès 1999, il mit en place un Bar des sciences (qui vient de fêter ses 10 ans !), il lança l'émission « Entrez dans la science » sur les ondes de Radio France Pays d'Auvergne (émission qui est toujours d'actualité !) et initia « Graine de physicien », un projet de découverte scientifique dans les écoles d'Auvergne. En 2003, il instaura les « Mercredis de la physique », conférences à destination des enseignants du secondaire et du grand public, qui, devenus les « Mercredis de la science », font maintenant partie intégrante de l'Université Ouverte Blaise Pascal. En 2007, il a publié un ouvrage intitulé *La physique au quotidien : petit traité à l'usage des enfants curieux*, rédigé à partir des questions de physique qu'il faisait paraître dans le journal *La Montagne* durant l'année mondiale de la physique. Depuis 2009, il co-anime un groupe de réflexion visant à installer un CRCSTI (centre régional de culture scientifique, technique et industrielle) en région d'Auvergne.

Avec Marie-Claire Cadeville et Jean-François Mathiot, le jury du prix Jean Perrin a voulu distinguer des acteurs régionaux incontournables de la diffusion de la culture scientifique. C'est grâce à leur abnégation et à leur travail de terrain (souvent difficile, ingrat et de longue haleine) que les sciences peuvent diffuser au plus près de la population de notre pays, et plus particulièrement auprès des jeunes.

# Prix Gentner-Kastler 2009 (commun DPG-SFP) : Theo Geisel

Né en 1948, Theo Geisel a étudié la physique à Francfort et à Regensburg. Depuis 1996, il est professeur de physique théorique à Göttingen, où il dirige l'Institut Max Planck de dynamique et d'auto-organisation.

Theo Geisel a reçu le prix Gentner-Kastler 2009 des sociétés allemande et française de physique pour sa contribution exceptionnelle à la théorie de la dynamique non linéaire (communément appelée « théorie du chaos »), qu'il a appliquée à divers systèmes complexes, comme le transport chaotique dans les nanostructures de semi-conducteurs, la propagation des épidémies ou les concepts fondamentaux du fonctionnement cérébral.

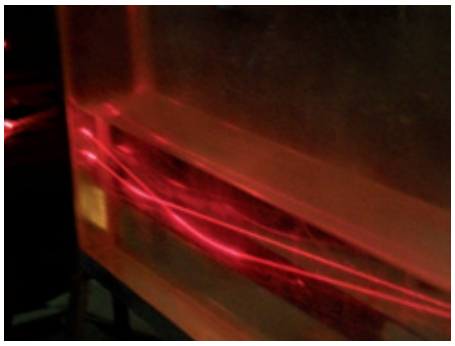
Comment est-ce que les myriades de neurones de notre cortex cérébral coopèrent quand, par exemple, on perçoit un objet ? Theo Geisel a apporté de nombreuses contributions importantes à la neuroscience théorique. Au début des années 1990, il a été l'un des premiers à clarifier le rôle des retards sur la synchronisation des réseaux de neurones. Il a aussi été l'un des pionniers de l'étude du développement des circuits dans le cortex visuel primaire. Dans la dernière décennie, avec ses collaborateurs, il a étudié extensivement la dynamique des grands réseaux de neurones en fonctionnement et y a découvert la présence d'attracteurs instables et de transitoires très longs et irréguliers, des phénomènes non triviaux qui n'auraient jamais pu être devinés ou compris sans une modélisation mathématique.

Il est maintenant le directeur du Centre Bernstein de Neuroscience numérique (BCCN) à Göttingen, l'un des centres leaders dans le domaine.

# XVII^e concours national des Olympiades de Physique France

© Agnès Vignes

❶ **Le sans-fil, ça vous branche ?** Mise en place du miroir métallique.



© Pascal Sonneville.

❷ **Mirages : trajectoires de deux faisceaux laser dans de l'eau,** saturée en sel, siège d'un gradient vertical d'indice.

© Pascal Sonneville.

❸ **Chute de la samare :** échantillons de samares d'érable et prototypes en papier (sur structure en balsa) et en carton.

Le fonctionnement des Olympiades est assuré grâce aux partenaires financiers : *ministère de l'Éducation nationale et ministère de la Recherche, CEA, C.Génial, CNRS, École polytechnique, Esso, Fondation d'entreprise EADS, Horiba-Jobin-Yvon, Fondation Nanosciences, National Instruments, Triangle de la Physique, Saint-Gobain.*
Le Comité des Olympiades remercie tous les partenaires et donateurs qui ont contribué au succès de la XVII^e édition du concours. Sa reconnaissance s'adresse aussi à tous les acteurs bénévoles de cette réussite.

**Parrainée par Serge Haroche, médaille d'or 2009 du CNRS, la XVII^e édition des Olympiades de physique a rassemblé 25 groupes de lycéens, les 29 et 30 janvier 2010 au Palais de la découverte.**

Comme d'habitude, un excellent accueil était réservé au concours par le Palais et son département de Physique. Trois des meilleurs projets, présentés par des lycéens de Terminale et choisis parmi les huit projets récompensés par un premier prix, sont résumés ci-dessous.

Les mémoires de tous les groupes finalistes peuvent être consultés à l'adresse : www.odpf.org/anterieures/xvii/les-memoires.php

## ❶ - Le sans fil, ça vous branche ?

S'interrogeant sur le Wi-Fi, les lycéens du lycée Gustave Eiffel de Dijon analysent les communications par ondes électromagnétiques. Ils construisent des antennes émettrice et réceptrice et en tracent le diagramme de rayonnement. Ils réalisent un émetteur avec oscillateur et mélangeur, un récepteur avec démodulateur, testent la directivité et la polarisation des antennes et l'atténuation du signal avec la distance, puis montrent avec aisance les manifestations du caractère ondulatoire des ondes électromagnétiques. Le jury apprécie la pédagogie des montages. Une idée le séduit particulièrement : en entrée, de la musique est mélangée au signal de la porteuse et, en sortie, après démodulation, c'est à l'oreille qu'on détecte les maxima ou minima d'intensité des ondes. Des interférences sont, par exemple, réalisées par réflexion, sur un miroir métallique, du faisceau d'ondes électromagnétiques modulé par le signal musical. Le détecteur doit être placé dans la zone de superposition du faisceau direct et du faisceau réfléchi.

## ❷ - Comment mettre les mirages en boîte ? Quelle idée tordue !

Après avoir montré que le mirage est lié à un gradient d'indice, le groupe du lycée Hoche de Versailles présente des mirages supérieur et inférieur ainsi que l'inversion de l'image. Des mesures de gradient d'indices dans l'eau et l'air débouchent sur les différences d'ordre de grandeur entre les deux situations. Un gradient de température, réalisé à l'aide de 25 bougies, fournit une déviation convaincante d'un faisceau laser. Les mesures sont conduites avec rigueur, tant au niveau des méthodes que de l'exploitation. Le jury apprécie la qualité visuelle des expériences, l'enthousiasme dont fait preuve le groupe, la démarche mise en œuvre pour comprendre l'origine des difficultés expérimentales et la ténacité pour réaliser un mirage dans l'air à l'échelle d'une classe.

## ❸ - La chute de la samare, ou quand l'arbre se mêle d'aérodynamisme

La samare est le fruit sec de l'érable ou de l'orme. Pour l'étude de sa chute, avec des moyens modestes, les élèves du lycée Pothier d'Orléans évoluent dans une démarche de recherche : questionnement, recherche d'échantillons représentatifs et construction de prototypes de même rapport masse/aire, modélisation et test des modèles. Grâce à la mise en œuvre d'une acquisition vidéo et à l'analyse des images, ils mettent en évidence deux phases de chute, sans et avec rotation. Assimilant la rotation à un ralentissement par frottements avec l'air, ils déterminent le coefficient de frottement. Ensuite, le groupe étudie les paramètres modifiant la vitesse limite. Enfin, les élèves tentent de vérifier si cette vitesse limite est bien fonction de la racine carrée du quotient de la masse sur l'aire de l'aile. Le jury apprécie une étude alliant statistique, cinématique, dynamique et modélisation.

**Le Comité national**
www.odpf.org

# Une enquête auprès des doctorants en physique

**À l'initiative de la section Rhône-Alpes Ouest de la Société Française de Physique, un questionnaire a été adressé aux doctorants en physique ou chimie travaillant dans les laboratoires lyonnais et stéphanois, en vue d'établir un bilan des difficultés qu'ils rencontrent durant la thèse et pour la préparation de leur entrée dans la vie active.**
**Bechir Rezgui, doctorant à l'INSA de Lyon, rédacteur du questionnaire, présente la synthèse des réponses reçues.**

Le questionnaire, envoyé à 150 doctorants, a reçu 105 réponses.

Près des trois-quarts (72%) des étudiants interrogés ont justifié leur choix de poursuivre leurs études par une thèse en physique, par l'intérêt particulier qu'ils portent à la discipline et parce qu'ils ont aussi le désir de pouvoir accéder, après leur doctorat, à une carrière dans le milieu académique comme chercheurs ou enseignants-chercheurs. Les autres (28%) envisagent de s'orienter vers l'industrie.

La majorité d'entre eux (84%) se déclare à peu près satisfaite de leurs conditions de travail, notamment des conditions matérielles. Néanmoins, un certain nombre de thésards (24%) s'estiment mal encadrés. De plus, certains ne sont plus rémunérés en fin de thèse, d'autres ne savent pas précisément si l'allocation qu'ils perçoivent va durer deux ou trois ans.

Le sujet majeur de préoccupation des doctorants est « l'après thèse ». La préparation à l'insertion professionnelle doit s'effectuer au cours des deux dernières années de thèse, avec le soutien des responsables des laboratoires d'accueil. Malheureusement, les thésards manquent souvent d'informations sur les débouchés professionnels qui leur seront offerts à l'issue du doctorat. La moitié des doctorants interrogés déclarent que leurs directeurs de thèse ne se préoccupent pas de leur avenir. Les faibles taux de recrutement dans le milieu académique, le problème de reconnaissance par le secteur privé du titre et de la formation doctorale, ainsi que le manque d'informations sur les débouchés, contribuent à accentuer l'inquiétude permanente des thésards concernant leur avenir et contrarient leurs activités de recherche.

**Bechir Rezgui** (bechir.rezgui@insa-lyon.fr)
Doctorant à l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INSA Lyon)

## Résultats de l'enquête

**Votre poursuite en thèse est :**
- ❑ Un choix personnel ..... 91 %
- ❑ Une opportunité ..... 0 %
- ❑ Autre ..... 9 %

**Comment estimez-vous votre encadrement en thèse ?**
- ❑ Très satisfaisant ..... 23 %
- ❑ Satisfaisant ..... 35 %
- ❑ Peu satisfaisant ..... 18 %
- ❑ Insatisfaisant ..... 24 %

**Depuis votre entrée au laboratoire, avez-vous trouvé :**
- ❑ Des conditions décevantes ..... 16 %
- ❑ À peu près ce que vous attendiez ..... 78 %
- ❑ Mieux que ce que vous espériez ..... 6 %

**Dans quel domaine souhaitez-vous vous diriger après votre thèse ?**
- ❑ Enseignement et recherche ..... 72 %
- ❑ Industrie ..... 28 %

## Réponse de la Commission « Jeunes de la physique »

Ces problèmes de ressentiment des doctorants, qui perdurent depuis de nombreuses années, ont fait l'objet d'une enquête approfondie de Robert Carles, publiée en 2007 dans *Reflets de la physique* n°4, p. 19. Il est plus qu'urgent d'y apporter des solutions. En France, où le nombre de postes permanents offert en recherche et dans l'enseignement supérieur est plus élevé que dans la plupart des autres pays européens, il apparaît que le problème le plus préoccupant, de nature culturelle dans notre pays, est celui de l'insertion des docteurs dans les entreprises. À ce sujet, on lira avec intérêt l'article de J.P. Hermann dans *Reflets de la physique* n°2, p. 19.

En complément de la nouvelle responsabilité d'insertion professionnelle qui incombe aux universités autonomes, la SFP a pris en 2009 deux initiatives importantes dans ce but :
- le partage d'une bourse à l'emploi[1] commune avec la Société Chimique de France, et la mise en place d'une cellule d'« aide à l'emploi » (préparation aux entretiens d'embauche et aide à la rédaction de CV) animée par Jean-Paul Hermann ;
- une campagne d'adhésion auprès des jeunes chercheurs, soutenue par le CNRS et le CEA, qui s'est traduite à ce jour par l'inscription de 700 nouveaux membres ; elle leur permettra de bénéficier, entre autres, des informations relayées par les organes de communication de la SFP (revue, site *web*…).

**Pierre Billaud**

1) www.societechimiquedefrance.fr/ . Pour avoir un « accès adhérents » sur ce site, utilisez comme identifiant votre nom avec la première lettre en majuscule, et comme mot de passe les chiffres de votre numéro d'adhérent SFP (sans les éventuelles lettres).

**1. Eduardo Pasquini** (photo de sa carte d'étudiant de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg).

# Hommage à Eduardo Pasquini

**15 avril 2010, Maison de l'Argentine de la Cité Universitaire de Paris : une cérémonie a eu lieu pour honorer la mémoire du physicien argentin Eduardo Pasquini.**

Dans les années 70, Eduardo a séjourné à la Maison de l'Argentine, avant d'être rejoint par sa famille. Pour obtenir son doctorat d'État en physique nucléaire, il a travaillé au Centre de Saclay du CEA, puis à l'Université de Strasbourg où il a achevé sa thèse en mars 1976, sous la direction d'Andres Zucker. De retour en Argentine, où un coup d'État venait de porter l'armée au pouvoir, il a été enlevé à son domicile en juin 1976 avec son épouse Liliana. Il fut impossible de savoir où ils étaient détenus. Dans les mois qui suivirent, des dizaines de physiciens perdirent leur emploi, furent arrêtés, emprisonnés ou disparurent.

Assez rapidement, la Société Française de Physique et la communauté des physiciens s'organisèrent pour faire connaître et dénoncer cette répression (voir le *Bulletin de la SFP*, les lettres aux journaux professionnels *Physics Today, The New Scientist*…). Dès décembre 1976, un « Comité pour la libération des physiciens argentins emprisonnés » vit le jour, présidé par Alfred Kastler, prix Nobel. Ce comité publia un bulletin d'information qui coordonnait les efforts de la communauté scientifique : délégations à l'Ambassade d'Argentine, collecte de 1400 signatures de physiciens, démarches auprès des autorités françaises et internationales pour intervenir auprès du régime militaire, collationnement et diffusion d'informations sur le sort des disparus. Alors que le comité s'était constitué pour obtenir la libération de nos collègues emprisonnés, la tragique réalité devait finalement s'imposer : pour presque tous, la détention se termina par l'assassinat et la disparition. Terrible bilan de la dictature militaire : 30 000 disparus (dont 32 physiciens). Comment ne pas évoquer la souffrance indicible infligée aux proches et aux enfants survivants ? Un bilan qui impose un devoir de mémoire, vérité et justice, sans quoi la société se mettrait en péril de revivre le cauchemar.

Cette réunion du 15 avril, organisée à l'initiative de l'AFA (Asociación Física Argentina), de la SFP (Société Française de Physique) et de la Maison de l'Argentine, a honoré ce devoir de mémoire à travers plusieurs contributions, dont celles de Martial Ducloy, président en exercice de la SFP, et de Cirano De Dominicis, président en 1976 ; celle, très émouvante, de Gabriela Pasquini, fille aînée d'Eduardo et de Liliana, elle-même physicienne à Buenos Aires ; et celles d'Andres Zucker et d'Alejandra Birgin, directrice de la Maison de l'Argentine. À la fin de la réunion, une plaque à la mémoire d'Eduardo Pasquini a été dévoilée.

**Cirano De Dominicis** (CEA/Saclay)
**et José Eduardo Wesfreid** (ESPCI)

**2. La cérémonie du 15 avril 2010.** De gauche à droite : le pianiste Miguel Angel Estrella (Ambassadeur d'Argentine à l'Unesco), au micro Cirano De Dominicis (ancien Président de la SFP), Alejandra Birgin (Directrice de la Maison de l'Argentine), Andres Zucker (ancien directeur de thèse de E. Pasquini), Gabriela Pasquini (fille de E. Pasquini), Martial Ducloy (Président de la SFP) et José Eduardo Wesfreid (co-organisateur de la réunion).

# Évry Schatzman (1920-2010)

## Le fondateur de l'école française d'astrophysique théorique

**Ancien président de la Société Française de Physique, président d'honneur de l'Union rationaliste, Évry Schatzman s'est éteint le 25 avril 2010, à l'issue d'une longue maladie.**

Ce sont les circonstances dramatiques de la Seconde Guerre mondiale qui ont conduit Évry Schatzman à l'astrophysique. Après l'arrestation de son père en décembre 1941, il quitte l'École normale supérieure et se cache à l'Observatoire de Haute-Provence. C'est là qu'un article de Gamow l'introduit dans la physique quelque peu exotique des naines blanches, étoiles qui sont un million de fois plus denses que le Soleil. Il constate que ces astres devraient exploser s'ils avaient la même structure physique que le Soleil. Il propose donc que, dû à la très forte gravité, le peu d'hydrogène que possèdent ces étoiles devait venir flotter à la surface, et ne pouvait servir de combustible nucléaire au centre. Cette découverte fera l'objet de sa thèse, soutenue en 1946 avec Louis de Broglie comme président du jury.

Ce travail remarquable le fait connaître de tous les grands astrophysiciens de l'époque. Bengt Strömgren l'invite à Copenhague, où il fréquentera Niels Bohr ; puis il ira à Princeton où il travaillera avec Lyman Spitzer et Martin Schwartzschild, séjours qui le confortent dans sa détermination de faire de la recherche en astrophysique.

Lorsqu'il revient à Paris, André Danjon, directeur de l'Observatoire de Paris, lui demande d'enseigner l'astrophysique dans le certificat de second cycle intitulé « Astronomie approfondie ». D'autres que Schatzman auraient choisi d'enseigner un sujet bien particulier ; lui, au contraire, décide de couvrir toute l'astrophysique ! Projet ambitieux, qui l'oblige à assimiler lui-même ce vaste domaine, alors en pleine expansion. Les bases étaient jetées de ce qui allait devenir l'école française d'astrophysique théorique. En 1954, l'Université de Paris crée pour lui la première chaire d'astrophysique en France. Il va attirer de nombreux étudiants, qui en auront à leur tour, et ainsi de suite. Pour loger tout ce monde, très à l'étroit à l'Institut d'astrophysique, il obtiendra la construction du Laboratoire d'astrophysique de Meudon où il s'installe en 1971.

Ses contributions scientifiques sont d'une grande variété et beaucoup d'entre elles auront un impact considérable. Il expliquera ainsi pourquoi le Soleil est un rotateur lent à cause de la perte de matière guidée le long du champ magnétique. Il sera le premier à calculer l'effet d'écran sur les réactions thermonucléaires. Il mettra en évidence le rôle des processus de mélange qui opèrent dans les étoiles. Il proposera la première explication pour l'accélération des rayons cosmiques. On pourrait multiplier les exemples.

Où Schatzman puisait-il l'énergie pour mener en parallèle sa recherche, son enseignement, et ses activités philosophiques, politiques et syndicales ? C'est seulement de manière indirecte que ses élèves découvraient ces activités extraprofessionnelles, car il ne se serait pas permis de faire du prosélytisme sur son lieu de travail, comme il ne mélangeait jamais science et politique. Ses engagements ont suscité quelquefois des inimitiés solides. La reconnaissance viendra pourtant : la Société Française de Physique lui décernera le prix Robin (1971) puis le prix Holweck (1975). En 1983 il recevra la médaille d'or du CNRS, et en 1985 il sera élu à l'Académie des sciences.

Nous garderons d'Évry Schatzman le souvenir d'un chercheur brillant et engagé, qui a lutté avec ardeur pour développer la culture scientifique. Aux astronomes il aura appris à préférer l'explication physique à la description phénoménologique, s'affirmant ainsi comme le fondateur de l'école française d'astrophysique théorique.

**Jean-Paul Zahn**
Laboratoire de l'Univers et de ses théories, Meudon

### Évry Schatzman, président de la SFP en 1977

En plus de trente ans, la situation de la recherche et de l'enseignement supérieur a bien changé. Pourtant il est frappant de voir, en relisant les discours de Schatzman, que ses préoccupations étaient proches de celles d'un président actuel : une exigence de moyens suffisants pour la recherche, un vif souci pour les carrières des hors statuts, une constante attention envers l'enseignement secondaire et la formation des maîtres, en particulier en premier cycle – on était à l'époque des commissions Lagarrigue –, un vif désir de sensibiliser l'opinion à l'importance de la physique et à « la présence des lois physiques à chaque tournant de l'existence ». Le congrès de la SFP à Poitiers, sous la présidence d'Évry Schatzman, a été marqué par le succès de la journée « physique dans la rue », dont la tradition s'est malheureusement perdue.

**Michèle Leduc**
Vice-présidente de la SFP

## Lancement d'une nouvelle revue

### International Journal of Metrology and Quality Engineering

Métrologie et ingénierie de qualité ne peuvent pas être dissociées, quel que soit le domaine. Les données expérimentales émanant d'un processus de mesure se doivent d'être manipulées et traitées correctement avec une connaissance réelle de la métrologie. Ainsi, cette nouvelle revue souligne l'importance de la discipline dans les différentes branches de l'ingénierie de qualité, lesquelles sont influencées par la qualité des données expérimentales utilisées, tant dans la théorie que dans la pratique, comme la sécurité et la fiabilité.
Ce journal concerne toutes les sciences appliquées utilisant des mesures, comme par exemple la mécanique, l'électronique, la physique, la chimie, la biologie, la médecine…

**www.metrology-journal.org**

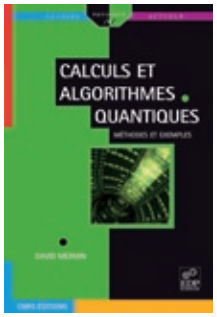
**Rédacteur en chef : Abdérafi Charki**

## Derniers ouvrages parus en physique

### Relativité restreinte – Des particules à l'astrophysique

**Éric Gourgoulhon**
Ce livre expose la relativité restreinte, depuis les bases géométriques jusqu'à des aspects avancés : elle est introduite en adoptant un point de vue quadridimensionnel (espace-temps de Minkowski). L'exposé ne se limite pas aux référentiels inertiels et considère des observateurs accélérés ou en rotation. Cela permet de discuter simplement d'effets physiques, tels que la précession de Thomas ou l'effet Sagnac. Dans les derniers chapitres, des aspects plus avancés sont abordés : champs tensoriels, calcul extérieur, hydrodynamique relativiste et incorporation de la gravitation.
Ce livre s'adresse aux étudiants de physique, du niveau L3 à M2, ainsi qu'aux chercheurs et à toute personne intéressée par la relativité. Sa lecture devrait également faciliter l'apprentissage de la relativité générale, en raison de l'approche géométrique adoptée.

*Collection Savoirs Actuels / ISBN : 978-2-7598-0067-4 / 804 pages / 69 €*




### Calculs et algorithmes quantiques – Méthodes et exemples

**David Mermin**
Cet ouvrage propose une introduction concise à la théorie du traitement de l'information quantique en présentant ses éléments de base, l'objectif étant d'intéresser un public de non-spécialistes. Il commence par une introduction à la théorie quantique, mais selon le point de vue d'un scientifique en sciences informatiques. Tout au long du livre, de nombreux exemples élémentaires illustrent l'algorithmique quantique et la très surprenante « réduction » du temps de calcul associée. Puis sont présentées des applications plus importantes, telles que l'algorithme de factorisation de Shor, l'algorithme de recherche de Grover et les codes correcteurs d'erreurs.

*Collection Savoirs Actuels / ISBN : 978-2-7598-0395-8 / 264 pages / 39 €*

### Thermodynamique des matériaux – Équilibres de phases et métastabilité

**Pierre Desré et Fiqiri Hodaj**
Les matériaux sont aujourd'hui de plus en plus complexes et, de ce fait, la thermodynamique reste un outil de choix pour aborder les différents aspects concernant leur élaboration, leur utilisation et leur comportement. À partir des concepts de base de la thermodynamique, cet ouvrage établit un bilan aussi complet que possible à ce jour, de ce que cette discipline peut apporter dans ce domaine. Sont abordées en particulier les transformations physiques et chimiques de la matière inorganique, ses équilibres stables et métastables, la physico-chimie des surfaces et interfaces et la description thermodynamique des systèmes nanométriques.

*Collection Science des matériaux / ISBN : 978-2-7598-0427-6 / 408 pages / 49 €*

# « Matière et matériaux – De quoi est fait le monde ? »

## Sous la direction d'Étienne Guyon, Alice Pedregosa et Béatrice Salviat

### Préface de Pierre Léna – Postface de Michel Serres

(Belin, collection Bibliothèque scientifique, 2010, 336 p., 27,50 €).

> « Comprendre la matière et ses usages en 100 sujets. »

Lorsque, à l'issue du primaire, les enfants entrent au collège, il n'est pas rare qu'ils soient désorientés : ils avaient, à l'école, fait et appris de *la* science – que ce soit dans une tonalité Main à la pâte ou dans une autre. Et les voici confrontés, en 6e, à ces deux cours distincts que sont les Sciences de la Vie et de la Terre (SVT) et la Technologie (T) avant d'aborder en plus, en 5e, la Physique et la Chimie (PC). Soudain il n'est plus question de la science, mais *des* sciences. D'unifiée, la science devient pour eux plurielle, additionnant (et mélangeant) des vocabulaires et des approches distincts. Alors, la vision qu'on leur propose du monde est celle d'un champ de disciplines quasi indépendantes, comme si le monde lui-même était un puzzle aux dessins disjoints. Comment ne pas comprendre la perplexité de l'enfant et ne pas compatir à son embarras lorsque, d'un concept comme l'énergie, il lui arrive de recevoir trois définitions radicalement différentes ?

À ce constat d'écoliers qui avaient aimé une science pratiquée à l'école au singulier et qui ne la reconnaissent plus, les deux Académies – Sciences et Technologies – ont voulu répondre en proposant au ministère, en 2006, un *Enseignement intégré de science et de technologie* (EIST)[1]. L'idée en est simple : elle consiste à réintégrer PC en 6e, puis à demander aux trois professeurs concernés (PC, SVT et T) de présenter chacun aux élèves une vision unifiée du programme, soit *La matière* en 6e et *L'énergie* en 5e. Cela suppose, de leur part, une concertation approfondie – dont tous disent combien elle est bénéfique pour leur propre enseignement – et les gratifie d'une présence face aux élèves bien augmentée puisqu'égale à la somme des temps partiels. Une cinquantaine de collèges pratiquent actuellement l'EIST, sur la base du volontariat, avec un succès qu'atteste la volonté qu'ont tous de continuer. Le ministre de l'Éducation nationale a récemment annoncé, à l'Académie des sciences, sa décision d'atteindre rapidement le nombre de 300.

C'est dans ce paysage neuf que vient de paraître *Matière et matériaux, de quoi est fait le monde ?* sous la direction d'Étienne Guyon, d'Alice Pedregosa et de Béatrice Salviat, livre superbe par la présentation que nous en offrent les Éditions Belin. Livre superbe, plus encore, par le cheminement qui nous y est proposé au travers d'un entrelacs d'objets et de phénomènes de la nature, d'artefacts et d'œuvres de l'homme, sans que l'on distingue, le plus souvent, s'il est question ici ou là de physique, de botanique, de géologie, de technologie, de chimie ou de biologie, tant ces « matières » sont fondues en *une* matière homogène ; tant elles s'effacent devant leur commune propriété d'offrir une vision à la fois belle et raisonnée du monde ; et tant le style en est familier et limpide.

Ainsi le lecteur s'initie-t-il – parmi bien d'autres sujets – à la structure du coton, aux conditions de tenue d'une fresque, à la sensation du mou et du doux, à la construction des ponts, à la perception des couleurs, au tri des grains, à l'art du luthier, à ce qu'est l'éponge à crevettes, à la luminosité des galaxies, à la mousse d'une bière tchèque, au principe d'une horloge à césium, aux secrets de la porcelaine, au pliage du papier, à la stabilité des châteaux de sable ou à la stratégie des arbres face au vent… Catalogue à la Prévert ? Non, mais liste merveilleusement ouverte en même temps que sous-tendue par un plan strict et une logique d'enchaînement rigoureuse. Et liste qui, aussi, évoque le génie d'un Pierre-Gilles de Gennes dont, en préface, Pierre Léna rappelle cette conférence mémorable faite, quelques mois avant sa disparition, pour l'inauguration de l'EIST.

*« Il est rare, écrit Michel Serres dans sa postface, […] que nous fassions, comme dans ce livre, le lien entre ces deux langues : la langue vernaculaire que chacun utilise dans sa vie courante et la langue scientifique que parle la communauté des chercheurs et qui a pour but l'universel.»* Entreprise rare peut-être, mais ici pleinement réussie.

**Yves Quéré**
Académie des sciences

(1) B. Salviat, « L'EIST, dans le sillage de *La main à la pâte* », Société franco-japonaise des sciences de l'éducation, Colloque annuel 2010. A. Pedregosa, « Dans le sillage de *La main à la pâte* : rencontre entre disciplines scientifiques au collège », *Reflets de la physique* **n°14** (2009), pp. 20-22.

# « L'humanité face au changement climatique »

## Robert Dautray et Jacques Lesourne (Éditions Odile Jacob, 2009, 320 p., 27 €).

Robert Dautray, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, et Jacques Lesourne, membre de l'Académie des technologies, apportent toute leur rigueur à un débat de grande actualité.

Le livre se compose en fait de deux parties : la présentation et la discussion des éléments qui conduisent aux changements de climat et leurs conséquences ; puis un ensemble d'annexes extrêmement riches. Dans la première partie, les auteurs s'efforcent de bien faire apparaître ce qui semble assuré et ce qui est encore en partie incertain, ce qui est global pour toute la surface de la Terre et ce qui est plus local, ce qui se produit à des échelles de temps de l'ordre de dizaines de millions d'années ou bien de l'ordre de milliers ou de centaines d'années. Ils expliquent scientifiquement l'ensemble des processus menant à l'effet de serre (au chapitre 2, ainsi que dans un encadré qui couvre les pages 148 à 155) ; ils décrivent ses conséquences, par exemple sur l'élévation des températures, sur le niveau des océans ou sur le cycle de l'eau. Citons un exemple de sous-titre parlant : *« Sur quelles bases, et avec quelle crédibilité, peut-on prévoir quelques caractéristiques des climats et de leurs conséquences suivant les mille sentiers des scénarios des activités humaines et des contre-réactions de la Nature ? »* Les auteurs examinent les effets d'un changement climatique sur les sociétés humaines dans les différentes régions du globe, sur l'économie, sur les technologies énergétiques – des combustibles fossiles au nucléaire et aux énergies renouvelables. Ils discutent enfin ce qui pourrait se produire dans les décennies à venir.

La deuxième partie s'appuie sur une documentation très fournie et à jour (les références aux articles originaux vont jusqu'à l'été 2009). Elle comporte les unités utilisées et les ordres de grandeur, un glossaire détaillé et précis de 56 pages – j'ai ainsi appris que le débit d'eau des océans se mesurait en *Sverdrup* (1 Sverdrup vaut 1 million de $m^3$ par seconde). Viennent ensuite des notes très fournies qu'il ne faut pas manquer ; on lira ainsi avec grand intérêt celles qui sont relatives au chapitre 2, expliquant, entre autres, les variations de l'insolation ou l'oscillation décennale nord-atlantique. Ces notes sont suivies de huit appendices très instructifs.

Ce livre fait comprendre les interactions multiples et complexes en jeu. Il doit susciter la réflexion et donne des clés pour comprendre de nouveaux travaux.

**Pierre Radvanyi**
Institut de physique nucléaire d'Orsay

# « Les paradoxes en physique »

## Philippe Ribière et Chérif Zananiri

(Ellipses, 2008, 140 p., 16 €)

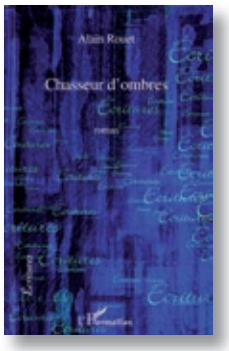
**Un livre à déconseiller**

Cet ouvrage balaye des champs disciplinaires aussi variés que la métrologie, la thermodynamique, la physique quantique, la relativité et la cosmologie. Si le sujet traité peut sembler alléchant, il apparaît que le texte – par ailleurs confus – est émaillé de graves incorrections et imprécisions en nombre significatif, dont voici un florilège.

À propos de l'effet tunnel – page 33 –, il est écrit que « Pour que cela soit possible, la particule doit avoir une vitesse supérieure à celle de la lumière… », ce qui est bien entendu incorrect pour une particule dotée d'une masse. Dans le chapitre traitant de la flèche des temps, respectivement pages 50 et 53, on peut lire : « Les évolutions irréversibles sont très peu probables, ce qui ne peut exclure *a priori* l'éventualité qu'elles aient lieu », ou encore « Et pourtant les lois physiques que nous connaissons sont toutes réversibles ». Concernant le premier point, c'est – bien entendu – tout l'inverse ; quant au second, les lois de la diffusion (Fick, Fourier, Ohm), connues depuis le XIX$^{e}$ siècle, infirment totalement cette affirmation péremptoire. Dans la même veine, il est possible de lire page 98 : « La théorie de la relativité restreinte se schématise en une phrase que voici : *Le monde est fixe, en équilibre dans un espace de dimension 4.* » En dehors de l'espace à quatre dimensions – non explicité par les auteurs –, le lecteur peut légitimement s'interroger sur la signification physique des mots « fixe » et « équilibre ». L'approximation du texte se retrouve dans les schémas et figures puisque page 101, celle décrivant l'expérience d'interférences de Fizeau annonce une vitesse de l'eau de 50 km par seconde, ce qui correspond à cinq fois la vitesse de libération terrestre, bien loin de la valeur historique de 7 m par seconde… Quant à la relation de de Broglie, $\lambda = hc/E$ – page 124 –, elle n'est valable que pour un signal lumineux et aucunement pour une particule de masse non nulle.

Bref, tout ceci donne un ensemble consternant, et il est à craindre que cet ouvrage ne tombe entre les mains d'apprentis physiciens que sont nos étudiants.

**La commission enseignement de la SFP**




# « Chasseur d'ombres »

## Alain Rouet (L'Harmattan, 2009, 194 p., 19 €).

### Efficacité de la brièveté

C'est un roman d'espionnage, ou peut-être faut-il dire deux romans, reliés par la personnalité d'un agent de la DST et celle de l'adversaire post-soviétique, opérant selon les canons du terrorisme moderne. Ce livre est adapté à notre vie trépidante, se lit en peu d'heures de TGV ou d'avion, au contraire des ouvrages de 600 à 700 pages, adaptés aux transatlantiques d'antan. Et cependant tout y est, de la vraisemblance des armes « post-modernes » aux descriptions de la psychologie des principaux acteurs. La méthode est originale : après de brèves indications éventuelles sur le décor, les actions des personnages sont décrites sans fariboles et quelques poèmes illustrent leurs rêves, et aussi ceux de l'auteur ; parfois, en cerise sur le gâteau, une remarque apporte un cadre culturel ou un jugement historique.

Quant aux intrigues, elles sont bien perverses, les méthodes des terroristes sont complexes, et tellement bien adaptées à certaines évolutions de nos sociétés occidentales que le lecteur peut se sentir inquiet. Dans le roman les choses finissent bien, les complots sont déjoués parce que c'est la loi du genre, et c'est peut-être la partie la moins vraisemblable ; les défauts de notre défense occidentale, les dérives de notre société sont décrites de façon si pertinente que l'on peut avoir froid dans le dos. Et si l'auteur a surtout voulu distraire son lecteur, il a également réussi à le faire réfléchir ; il n'a pas pu cacher sa vraie nature.

**Pierre Averbuch**
Directeur de recherche honoraire au CNRS

L'inspecteur Bred de la DST poursuit deux enquêtes liées au terrorisme international qui vont tour à tour impliquer un universitaire travaillant sur les atomes instables, archétype du chercheur brillant investi dans sa recherche mais peu sensibilisé à ce type de danger, puis le créatif directeur technique d'une société d'armement ayant mis au point une nouvelle arme basée sur des drones. Les inventions de ces deux hommes vont être utilisées par des organisations basées au Moyen-Orient pour tenter de mettre en péril le parlement américain ou l'équilibre militaire mondial. Au cours de ces deux aventures racontées dans un style bref et efficace qui mêle de courts poèmes mettant en lumière la richesse de ces personnalités et des descriptions à la serpe de ces milieux, Alain Rouet nous entraîne dans deux mondes qu'il connaît parfaitement, la recherche universitaire en physique et l'organisation des grands groupes industriels. Deux courts thrillers qui tiennent en haleine.

**Patricia Bassereau**
Institut Curie

# Université d'été de « Sauvons le climat »

L'association « Sauvons le climat » (SLC), dont la SFP est partenaire, organise comme tous les ans son université d'été.

**Les 24 et 25 septembre 2010 à Dijon.**
Elle comportera deux thèmes : **l'OCÉAN et la VILLE**.

L'Université d'été sera précédée le **23 septembre** par une conférence ouverte au public, **présentée par Jean Poitou**, secrétaire général de SLC et ancien directeur adjoint du LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) : **« Réchauffement climatique : mythe ou réalité ? »**

**Sujets traités dans les exposés :**

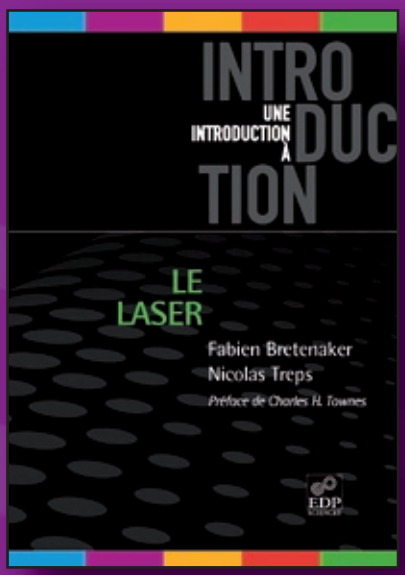
- Océan et climat, Cycle du carbone et océan, Acidification de l'océan, Énergies marines renouvelables, Énergie des courants de marée, Énergie de la houle, Énergie à partir des micro-algues.
- À quoi servent les villes ? Émergence des formes urbaines, Dynamiques territoriales en France, Prospective des ruralités, Rénovation du bâti, Dynamique des villes chinoises, L'environnement et le social dans le cas des villes.

**Les membres de la SFP sont bienvenus.**
**Informations et inscription :**
http://sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?rubrique99

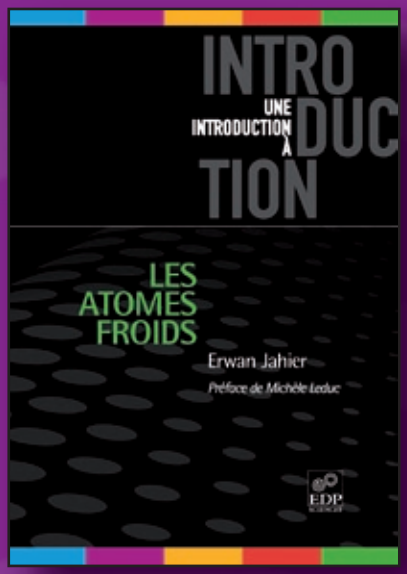
# Collection

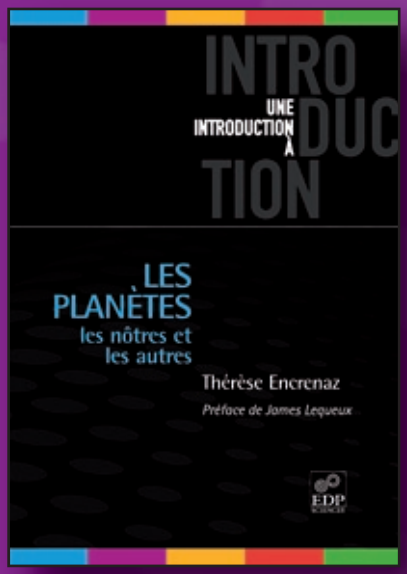
# UNE INTRODUCTION À...

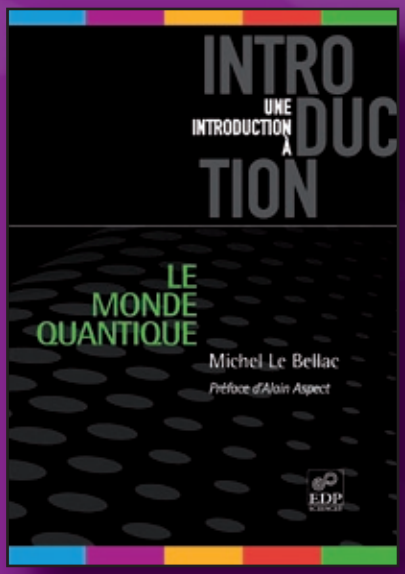
Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.




La nouvelle collection « **UNE INTRODUCTION À ...** », dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac, se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science.




www.edpsciences.org